

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELLENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN

SAMENHANGENDE MET DE PRODUCTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

REDACTIE: NATUURKUNDIG LABORATORIUM DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN, EINDHOVEN

DE OXYDATIE VAN HITTEBESTENDIGE LEGERINGEN BIJ AANWEZIGHEID VAN VREEMDE OXYDEN

door J. L. MEIJERING en G. W. RATHENAU.

669.018.44:620.196:
546.776-31

De constructie van de moderne thermische motoren met hun hoge werktemperaturen is mogelijk geworden door de ontwikkeling van hittebestendige legeringen die de gewenste mechanische eigenschappen bezitten. Nochtans doen zich bij deze constructies nu en dan eens gevallen voor van een onverwacht snelle corrosie van onderdelen. De schrijvers is het gelukt door een gedetailleerde studie enig licht op de oorzaken van zulke corrosieverschijnselen te werpen.

De belangstelling van de techniek voor hittebestendige legeringen is in de laatste jaren gaandeweg toegenomen. In het bijzonder zijn deze legeringen belangrijk geworden voor de constructie van de moderne thermische motoren (gasturbines, straalmotoren, heteluchtmotoren), waarbij ter verkrijging van een hoog rendement geëist wordt dat de metallische constructie-onderdelen werktemperaturen verdragen die boven 700 °C liggen. De te gebruiken materialen moeten met name voldoen aan de voorwaarden dat de plastische rek en de door chemische reactie met de omgeving veroorzaakte corrosie, bij de gekozen werktemperatuur en mechanische belasting, gedurende een redelijke gebruiksduur de toleranties niet te boven gaan. Dit artikel zal een bepaald aspect van deze verschijnselen behandelen, en wel speciaal de corrosie van hittebestendige metalen en legeringen door oxydatie.

In principe kan men de oxydatie van metallische onderdelen bij hoge temperaturen langs twee wegen ontlopen.

Ten eerste kan men metalen kiezen die met betrekking tot hun omgeving te edel zijn om te oxyderen. Dit betekent dat de zuurstofdruk (dissociatiedruk) van de oxyden, die van het metaal zouden kunnen worden gevormd, bij de werktemperatuur groter is dan de partiële druk van zuurstof in de atmosfeer waarin het metaal zich bevindt. Van zilveroxyde Ag_2O bijv. bedraagt de zuurstofdruk boven ongeveer 150 °C meer dan $\frac{1}{5}$ atmosfeer, zilver is dus boven deze temperatuur oxydatiebestendig in lucht van atmosferische druk.

Om hun ongunstige mechanische eigenschappen en hoge prijs worden edele metalen (of legeringen daarvan) als constructiemateriaal voor hittebestendige onderdelen vrijwel niet gebruikt. Meestal slaat men de tweede weg in waarop we hierboven doelden: men kiest basis- of legeringselementen die de eigenschap hebben dichte, vast hechtende, voor zuurstof- en metaalionen vrijwel ondoordringbare oxydehuiden op het metaal te vormen. Hierbij is er, bij de werktemperatuur, wel degelijk een oxydatieneiging van de onder de huid gelegen legering, maar de snelheid waarmee het oxydatieproces voortschrijdt wordt door de transportbelemmering tot een voldoende lage waarde teruggebracht. We kunnen het zo uitdrukken dat in het geval van de edele metalen de thermodynamica (ligging van het dissociatie-evenwicht van het oxyde) voor de oxydatiebestendigheid zorgt, terwijl in het geval van de beschermende oxydehuid alleen de kinetica van de oxydatie in voor ons gunstige zin is beïnvloed.

Wat nu de bescherming door een oxydehuid betreft, moet men er in vele in de praktijk voorkomende gevallen mee rekenen dat het materiaal aan de oppervlakte niet alleen met zuurstof of lucht in contact is, maar bovendien met vreemde stoffen, bijv. oxyden die een geheel andere chemische samenstelling hebben dan de oxydehuid waaraan de oxydatiebestendigheid te danken is. Het is sinds lang bekend dat door zulk een contact de oxydatiebestendigheid soms aanzienlijk kan worden verminderd. Een voorbeeld hiervan zien we in

electriche verhittingsdraden die met bepaalde keramische massa's worden omgeven. Een spoortje asbest in die massa kan een op 1300 °C verhitte draad van FeCrAlCo 73/20/6/1¹⁾ („Kanthal“) in enkele seconden doen doorbranden, terwijl de normale levensduur bij die temperatuur honderden uren bedraagt. Een ander voorbeeld is de abnormaal sterke aantasting van roestvrije stalen in verbrandingskamers die met stookolie worden gestookt²⁾. Hierbij is het in dergelijke oliën vaak aanwezige vanadiumoxyde de schuldige; dit oxyde kan tot 80% van de verbrandingsresten van de olie uitmaken. Een derde voorbeeld heeft betrekking op molybdeniumhoudende roestvrije stalen, waaruit bij de werktemperatuur vluchtig molybdeniumoxyde MoO₃ ontstaat³⁾. Ook hier treedt een abnormaal sterke corrosie op, die moet worden toegeschreven aan de reactie van de oxydehuid van het metaal met de MoO₃-damp.

Analoge verschijnselen kwamen de schrijvers tegen, toen in het Philips-laboratorium te Eindhoven de oxydatiebestendigheid werd nagegaan van hittebestendige koperlegeringen en stalen bij 750 °C in lucht die door molybdeniumoxyde MoO₃ sterk verontreinigd was. Bij een aluminiumbrons (AlCu 8/92) bijv., dat in een door MoO₃-damp verontreinigde oven werd gegloeid, werd na afborstelen van het gevormde, los op het oppervlak zittende oxyde een gewichtsverlies geconstateerd dat vele

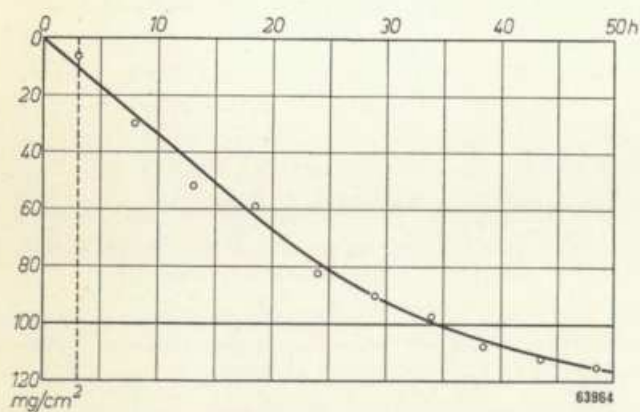


Fig. 1. Oxydatie van een plaatje van aluminiumbrons, AlCu 8/92 (vgl. noot¹⁾), dat bij 750 °C werd gegloeid in lucht verontreinigd met damp van molybdeniumoxyde MoO₃. Uitgezet is het gewichtsverlies, bepaald na afborstelen van het losse oxyde, als functie van de tijd. — Na drie uur gloeien werd het plaatje in zuivere lucht overgebracht; de oxydatie blijkt dan in ongeveer hetzelfde tempo door te gaan.

¹⁾ D.i. een legering met 73 gew. % Fe, 20 gew. % Cr, 6 gew. % Al, 1 gew. % Co; we bedienen ons in het vervolg steeds van deze verkorte schrijfwijze.

²⁾ P. Schlöpfer, P. Amgwerd en H. Preis, Schweizer Archiv 15, 291, 1949.

³⁾ W. C. Leslie en M. G. Fontana, Trans. Am. Soc. Metals 41, 1213, 1949.

honderden keren groter was dan het welk bij oxydatie in zuivere lucht wordt gevonden. Fig. 1 laat zien dat het gewichtsverlies in de verontreinigde atmosfeer na 3 uur al 6 mg/cm² bedroeg, tegenover ca 0,01 mg/cm² in zuivere lucht. Merkwaardig is in dit geval ook, dat blijkens de figuur de corrosie nog in snel tempo doorgaat wanneer het materiaal vervolgens in een zuivere (geen MoO₃ bevattende) atmosfeer wordt verdergegloeid. Op deze bijzonderheid komen wij hieronder nog even terug (zie fig. 5b).

Om een algemeen inzicht te krijgen in de beïnvloeding der oxydatie van metalen door contact van de beschermende oxydehuid met vreemde stoffen, met name oxyden, zijn in dit laboratorium een aantal systematische proeven gedaan. Hierbij was steeds MoO₃ het vreemde oxyde, doch uit hetgeen volgt zal blijken dat wij de uitkomsten, en het hieruit ontwikkelde beeld, ook dan als min of meer representatief voor het corrosiemechanisme kunnen beschouwen wanneer andere vreemde oxyden werkzaam zijn, en waarschijnlijk ook in het geval dat een metaal niet door lucht maar door andere gassen, bijv. chloor, wordt aangetast.

Kwantitatieve bepaling van de mate van oxydatie

In de eerste plaats werd, langs verschillende wegen, het verloop van de oxydatie met de temperatuur nagegaan. Hierbij bleek al spoedig dat een door MoO₃ veroorzaakte abnormale oxydatie van hittebestendige legeringen reeds bij vrij lage temperaturen kan optreden, tot zelfs beneden 500 °C. Dit werd geconstateerd door de monsters van de te onderzoeken metalen en legeringen tijdens het gloeien in innig contact met MoO₃-poeder te brengen. Een contact alleen met een MoO₃-houdende atmosfeer veroorzaakt bij deze temperaturen nog geen noemenswaardig snel voortschrijdende corrosie, daar de dampdruk van MoO₃ bij 500 °C nog slechts ongeveer 10⁻⁵ mm Hg is. Voor een juiste onderlinge vergelijking werden daarom bij alle proeven de te onderzoeken monsters in MoO₃-poeder ingepakt en dan in lucht gegloeid. Zorgvuldig gescheiden hiervan werden telkens vergelijkingsmonsters van dezelfde samenstelling op dezelfde temperatuur alleen in zuivere lucht gegloeid.

Om de omzetting door oxydatie kwantitatief te volgen, is in de proef van fig. 1 het gewichtsverlies van het metaal tot maatstaf genomen. Het blijkt echter dat dit in sommige gevallen moeilijkheden oplevert, doordat de gevormde oxydehuid soms moeilijk volledig te verwijderen is en doordat bovendien de abnormale aantasting vaak slechts plaatselijk optreedt (hetgeen uit het vervolg begrijpelijk zal worden). Beide factoren leiden

tot een grote spreiding in de uitkomsten. In fig. 2 is dit duidelijk te zien. Hier is als functie van de temperatuur uitgezet het gewichtsverlies dat werd gemeten aan een reeks plaatjes van hetzelfde aluminiumbrons als gebruikt voor de proef van fig. 1,

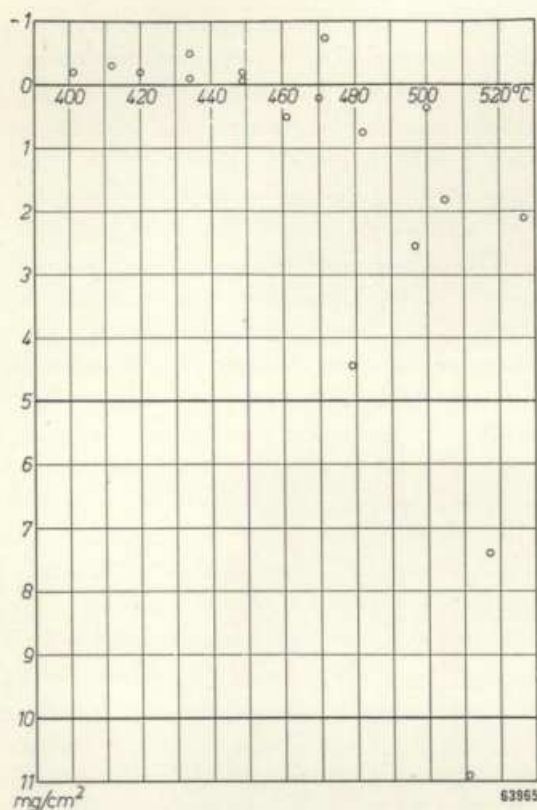


Fig. 2. Gewichtsverlies van plaatjes van AlCu 8/92, ingepakt in MoO₃-poeder en gedurende 3 uur in lucht gegloeid op verschillende temperaturen.

elk plaatje 3 uur gegloeid in contact met MoO₃ en lucht. De figuur toont dat er in de buurt van 480 °C een aanzienlijke stijging van de oxydatiesnelheid optreedt, maar meer gedetailleerde conclusies over het verloop met de temperatuur zijn uit meetpunten met zulk een sterke spreiding moeilijk te trekken.

Een meer betrouwbare en eenvoudige uitvoerbare methode om de mate van oxydatie te bepalen, bleek de volgende te zijn.

Van elk te onderzoeken materiaal werd genomen een stel van vijf draadjes (diameter $2r_0 = 1/2$ mm), die door voorgloeien in een zuiver mengsel van stikstof en waterstof in een reproduceerbare, spanningsvrije aanvangstoestand waren gebracht. Na afloop van de oxydatie in contact met MoO₃ en lucht werd, bij kamertemperatuur, de gemiddelde breekkracht (K_M) der draadjes met een normale trekbank bepaald. Ter vergelijking diende een gelijksoortig stel draadjes, die even lang en op dezelfde temperatuur werden gegloeid in zuivere lucht, waarna eveneens de gemiddelde breekkracht er

van werd gemeten (K_A). Als maat voor de abnormale oxydatie hebben we nu een „effectieve indringdiepte” d gedefinieerd:

$$d = (1 - \sqrt{K_M/K_A}) r_0 \dots (1)$$

De definitie berust op de onderstelling dat de draden die aan de trekproef worden onderworpen, steeds bij dezelfde trekspanning breken en dat er geen noemenswaardige kerf-effecten optreden. Dit wil zeggen dat alle draden breken bij eenzelfde waarde van het quotient van breekkracht en oppervlakte van de resterende draaddoorsnede. Dringt de oxydatie aan de omtrek van de draad tot een diepte d door, dan vermindert de straal r_0 van de werkzame draaddoorsnede tot $r_0 - d$, waaruit direct de bovenstaande formule volgt (mits, zoals inderdaad gevonden wordt, de aantasting in zuivere lucht verwaarloosbaar klein is).

De indringdiepte d heeft betrekking op de meest aangetaste plekken, daar een trekstaaf op de dunste plaats pleegt te breken. Derhalve kunnen, ook al is de oxydatie op sommige plaatsen door bijkomstige oorzaken belemmerd (zie hieronder), met deze meetmethode en definitie toch reproduceerbare resultaten worden verwacht. Hierbij valt nog op te merken dat de door de breekkracht gemeten indringdiepte voor de praktijk een heel goede maat is voor de corrosie, daar het hier immers juist aankomt op de, eventueel slechts plaatselijke, achteruitgang van de mechanische sterkte van constructie-onderdelen. Voor een goed begrip van het aantastingsmechanisme echter is het wel degelijk ook van belang te weten, of en in hoeverre er sprake is van een alzijdige aantasting dan wel van een plaatselijke, bijv. interkristallijne, penetratie. Daarom werden ook microscopische praeparaten van de draden onderzocht.

Dat voor de indringdiepte inderdaad goed reproduceerbare waarden worden gevonden, moge blijken uit fig. 3. Deze figuur geeft, wederom voor het aluminiumbrons AlCu 8/92 waarop ook fig. 1 en 2 betrekking hebben, de volgens (1) bepaalde indringdiepte d na 3 uur gloeien, als functie van de gloei-

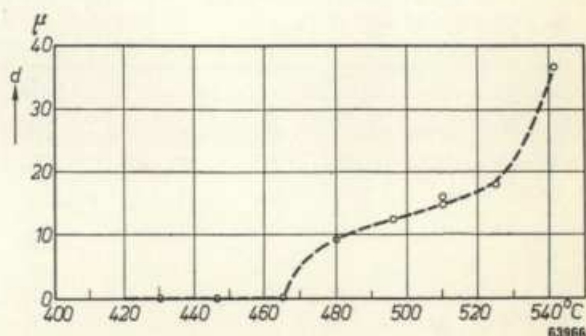


Fig. 3. Indringdiepte d , bepaald uit trekproeven, van draden van AlCu 8/92 die (op dezelfde wijze als de plaatjes van fig. 2) werden geoxydeerd door 3 uur gloeien in MoO₃-poeder en lucht, op verschillende temperaturen.

temperatuur. De meetpunten vertonen nu slechts een geringe spreiding en men kan in de kromme die door de punten bepaald wordt duidelijk twee discontinuïteiten onderkennen, de eerste bij 470 °C, de tweede in de buurt van 535 °C.

Vloeistofvorming bij en in de beschermende oxydehuid

Het feit dat de snelheid van oxydatie bij heel bepaalde temperaturen discontinu verandert, doet de gedachte opkomen dat hier phase-overgangen, met name smelten of verandering van kristalstructuur, een rol zullen spelen. Op zichzelf is deze gedachte niet nieuw. Men heeft al eerder de mogelijkheid geopperd dat bij een versnelde oxydatie een vloeistofvorming in het spel zou kunnen zijn ⁴⁾. Ook de in het begin genoemde voorbeelden wijzen in die richting: asbest, dat de snelle corrosie van verhittingsdraden kan veroorzaken, smelt in de buurt van de in dat verband genoemde temperatuur van 1300 °C; het vanadiumoxyde, dat in de stookolie voorkomt, smelt al bij ca 650 °C. Van molybdenumoxyde ligt het smeltpunt weliswaar veel hoger dan de temperatuur van ca 500 °C waarbij al een abnormale aantasting werd gevonden, nl. bij 795 °C. Ook hierbij is echter een vloeistofvorming reeds bij die lage temperaturen denkbaar, indien er laag smeltende eutectica optreden.

Om deze gedachte te toetsen, hebben wij de eutectische temperaturen van de betrokken oxydesystemen bepaald, met behulp van temperatuur-tijd-lijnen (bij afkoelen van een smelt wijst een vertraging van de afkoeling op een afscheiding van kristallen, een tijdlang stilstaan van de afkoeling op het bereiken van een eutecticum, waarbij de gehele vloeistof stolt, zoals ook direct is waar te nemen). In het geval van het genoemde aluminium-brons in combinatie met MoO₃ vonden wij, dat het binaire systeem ⁵⁾ MoO₃-Cu₂O een eutectische temperatuur heeft van 535 °C. De eutectische temperatuur van het ternaire systeem MoO₃-MoO₃-Cu₂O bleek 470 °C te zijn (die van MoO₃-MoO₂ ligt bij 778 °C).

Niet alleen vinden we hier dus inderdaad heel laag smeltende eutectica, maar de opvallende overeenstemming van de eutectische temperaturen — dit zijn dus de laagste temperaturen waarbij vloeistoffen aan het oppervlak van de legering kunnen optreden — met de discontinuïteiten in fig. 3

verleent op fraaie wijze steun aan de hypothese dat er tussen de vloeistofvorming en de sterk versnelde corrosie een oorzakelijk verband bestaat ⁶⁾ ⁷⁾.

Hoe kan nu de versnellende werking van de vloeistofvorming op de oxydatie worden begrepen? Men zal zich moeten voorstellen dat de vloeistof, zelfs indien slechts in kleine hoeveelheden aanwezig, langs de korrelgrenzen van het beschermende oxyde doorlopende kanalen vormt, en dat de diffusie en convectie in deze vloeistofkanalen, die een veel snellere uitwisseling van metaal- en vooral ook van zuurstofatomen mogelijk maken dan in een vaste phase, de bescherming door de oxydehuid illusoir maken. Dat er zulke kanalen kunnen worden gevormd, is zeer aannemelijk. De grensvlakenergie van twee aan elkaar grenzende korrels van een kristallijne phase (de oxydehuid) is meestal zo groot dat een aan de korrelgrenzen aanwezige vloeibare phase, die zich gemakkelijk aan de locale atoomstructuur kan aanpassen, tot verlaging der totale grensvlakenergie leidt. Een spectaculair voorbeeld hiervan is het bekende geval van koper gedompeld in gesmolten bismuth. De vloeistof loopt hier langs de oppervlakken der aan elkaar grenzende korrels diep het metaal in, dat hierdoor uiterst bros wordt ⁸⁾. In vele andere gevallen, waar de grensvlakenergieën aan de korrelgrenzen misschien minder groot zijn, zal de vloeistof althans langs de ribben, waar drie korrels bij elkaar komen, naar binnen kunnen lopen.

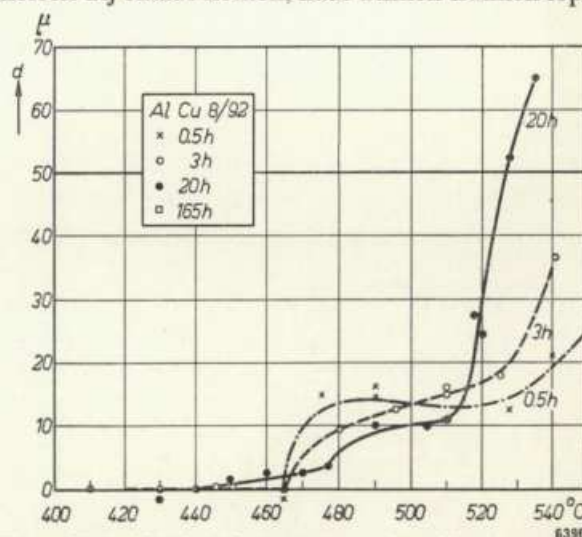


Fig. 4. Hetzelfde als in fig. 3, maar nu ook na 1/2 uur resp. 20 uur en 165 uur gloeien. De indringdiepte hangt, bij niet te hoge temperaturen, op eigenaardige wijze af van de gloeitijd. Dit wordt verklaard door een kerfwerking in het begin van de oxydatie.

⁴⁾ Zie bijv.: W. Hessenbruch, *Metalle und Legierungen für hohe Temperaturen*, L. J. Springer, Berlin 1940. — Merkwaardig genoeg is dit denkbeeld in de laatste tijd, zoals uit het in ³⁾ aangehaalde artikel blijkt, weer op de achtergrond geraakt.

⁵⁾ De invloed van Al₂O₃ op de eutectische temperaturen is verwaarloosbaar klein.

⁶⁾ J. L. Meijering en G. W. Rathenau, *Nature*, London **165**, 240, 11 Febr. 1950.

⁷⁾ G. W. Rathenau en J. L. Meijering, *Metallurgia*, verschijnt binnenkort. In dit artikel wordt uitvoeriger verslag uitgebracht van de hier behandelde onderzoeken, in het bijzonder ook van proeven met diverse legeringen die hier niet ter sprake komen, en van de resultaten van het metallografische onderzoek.

⁸⁾ C. S. Smith, *Trans. A.I.M.E.* **175**, 15, 1948.

Bijzonderheden bij de vorming der eutectica

Eigenaardig is bij het boven besproken geval, dat het laag smeltende eutecticum niet door samenspel van het toegevoegde MoO_3 met het „beschermende” oxyde Al_2O_3 tot stand komt, maar door reactie met oxyden van het basismetaal, koper. (De oxydatie van zuiver aluminium wordt dan ook door MoO_3 niet versneld!). Dat zulk een reactie mogelijk is, moeten wij waarschijnlijk daaraan toeschrijven dat in de oxydehuid van het aan de lucht geoxydeerde AlCu ook Cu -oxyden aanwezig zijn, terwijl anderzijds het MoO_3 ook direct met het Cu uit het basismetaal zou kunnen reageren door kleine beginscheuren in de beschermende oxydelaag. Spelen dergelijke scheuren inderdaad een rol, dan wordt begrijpelijk waarom de reactie vaak gelocaliseerd is, zoals

hierboven naar aanleiding van de definitie der indringdiepte werd vermeld ⁹⁾. Zo kan wellicht ook het feit worden verklaard dat de indringdiepte, zonderling genoeg, aanvankelijk met toenemende gloeitijd schijnt af te nemen. Fig. 4 laat dit effect zien. Is de aantasting, doordat zij van scheurtjes in de oxydehuid moet uitgaan, in het begin plaatselijk sterk beperkt, dan verlaagt zij de breekkracht onevenredig sterk door kerfwerking. Na langere tijd worden de verschillen in aantasting vereffend, zoals fig. 5a en b laten zien.

Uit fig. 6 is de invloed van MoO_3 op de oxydatie van zuiver Cu af te leiden. Hier is het natuurlijk een van de beschermende

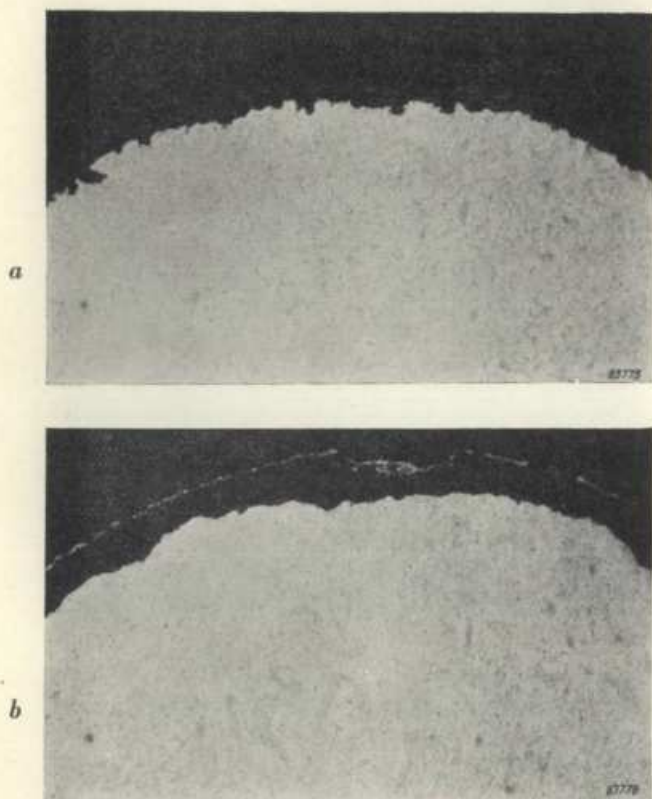


Fig. 5. a) Microfoto van de, zwak geëtste, dwarsdoorsnede van een draad van AlCu 8/92 na $\frac{1}{2}$ uur gloeien op 510°C in MoO_3 en lucht. De zwarte omgeving is kunsthar („Philite”), waarin de draad werd ingeperst om het vlak slijpen van het oppervlak van de doorsnede mogelijk te maken. De aantasting van het oppervlak van de draad is sterk gelocaliseerd (kerfwerking bij de trekproef). Vergroting $600\times$. b) Hetzelfde als (a), van een draad die 3 uur werd gegloeid. De aantasting is hier kennelijk gelijkmatiger geworden. — Aan de buitenkant van de draad is bij dit praeparaat duidelijk een lichte ring te zien. Hier heeft zich, zoals ook door röntgendiffractie-onderzoek werd aangetoond, een laag van zuiver Cu gevormd, dat zich blijkbaar bij het afkoelen van de draad na het gloeien uit het vloeibare oxydemengsel heeft afgescheiden. Onder deze laag ziet men weer een, iets anders getinte, donkere ring, die (wederom volgens röntgendiffractie-onderzoek) grotendeels uit molybdeniumoxyden blijkt te bestaan. Deze oxyden zijn verantwoordelijk voor het bovenvermelde feit dat de blanke, uiterlijk van oxyde ontdane draad, overgebracht in zuivere lucht en verder gegloeid, toch nog in snel tempo verder wordt geoxydeerd (vgl. fig. 1).

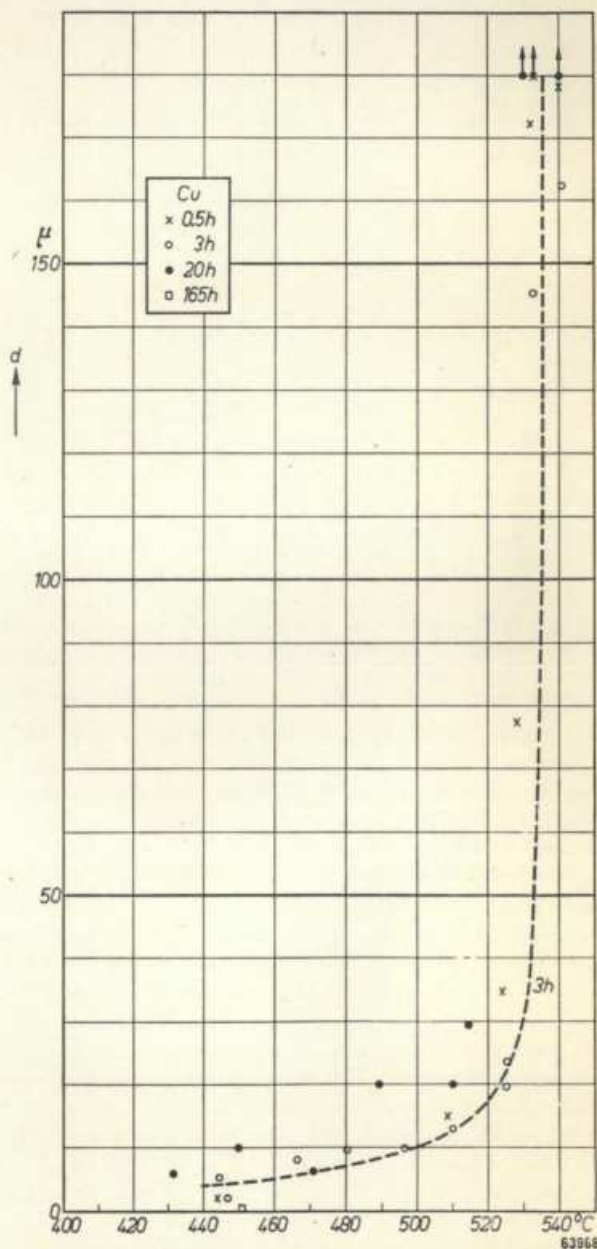


Fig. 6. Indringdiepte als functie van de gloeitemperatuur, bij aantasting van draden van zuiver koper (OFHC) door MoO_3 en lucht.

⁹⁾ Door het samenvloeien tot grotere vloeistofdruppels kan de toevoer van MoO_3 plaatselijk verbroken worden en een localisatie der aantasting op zeer grove schaal optreden.

oxyden zelf dat met het vreemde oxyde reageert, en wel Cu_2O (CuO vormt pas bij 735°C een eutecticum met MoO_3). De invloed van het eutecticum bij 535°C , van $\text{MoO}_3\text{-Cu}_2\text{O}$, is zeer duidelijk. Het ternaire eutecticum bij 470°C , van $\text{MoO}_3\text{-MoO}_2\text{-Cu}_2\text{O}$, daarentegen komt hier niet naar voren, al is de invloed er van wel te zien in metingen van het gewichtsverlies, die gevoeliger zijn dan die van de indringdiepte als men een eerste begin van versnelde oxydatie wil aantonen.

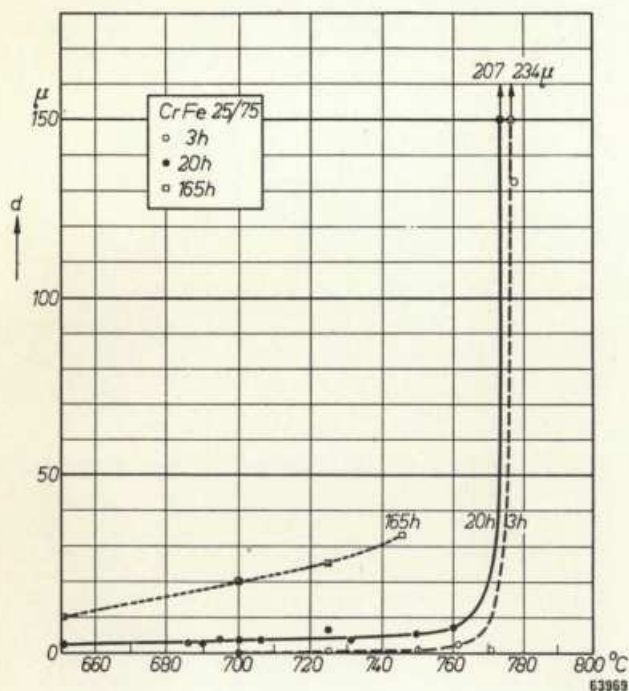


Fig. 7. Indringdiepte als functie van de gloeitemperatuur, bij aantasting van draden van CrFe 25/75 door MoO_3 en lucht.

Dat de vorming van MoO_2 uit MoO_3 hier niet en bij de Al-Cu-legeringen wel goed merkbaar is, is te begrijpen door de sterk reducerende werking van Al (grote stabiliteit van Al_2O_3).

Ook bij hittebestendige legeringen van ijzer doet zich het eenvoudige geval voor dat een sterke toeneming van de oxydatie optreedt bij die temperatuur waarbij het beschermende oxyde zelf onder vloeistofvorming met het toegevoegde oxyde reageert. In fig. 7 zijn de indringdiepten voor chroomijzer CrFe 25/75 uitgezet. De sterke toeneming van de oxydatie boven 770°C correspondeert met het vloeibaar worden van het eutecticum $\text{MoO}_3\text{-MoO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$. Dit is niet het laagst smeltende van alle mogelijke eutectica in het gehele systeem: het laagste eutecticum van $\text{FeO-MoO}_2\text{-MoO}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ bleek volgens onze metingen te liggen bij 705°C . Waarom dit eutecticum in de curven van fig. 7 niet naar voren komt, is niet met zekerheid te zeggen, maar het kan in principe verklaard worden door het feit dat in de beschermende oxydehuid slechts zeer weinig FeO aanwezig is, te weinig om bij de reactie met $\text{MoO}_3\text{-MoO}_2$ in het voor de vorming van het laagste eutecticum geschikte gebied van het (quaternaire) fase-diagram te komen. Ook een ander laag smeltend eutecticum dat in het genoemde systeem van oxyden kan optreden, nl. bij ongeveer 725°C , komt in fig. 7 niet tot uitdrukking. De invloed van dit eutecticum wordt daarentegen wel duidelijk gezien bij een chroomijzerlegering die nog 9% nikkel bevat; zie fig. 8.

Andere factoren die er toe bijdragen de oxydatie te versnellen

Het is de overeenstemming tussen een eutectische temperatuur en een discontinuïteit in het verband van indringdiepte en temperatuur, die aanleiding geeft om vloeistofvorming in de oxydehuid als oorzaak van de waargenomen versnelde oxydatie te beschouwen. Vloeistofvorming kan echter niet de enige oorzaak zijn. Fig. 7 en 8 bijv. laten duidelijk zien dat de aanwezigheid van MoO_3 ook een meer of minder geleidelijke toeneming van de oxydatie van chroomijzerlegeringen teweegbrengt beneden 705°C , wat in dit geval, zoals boven vermeld, de laagste eutectische temperatuur was.

Nu kan een versnelling van de oxydatie ook bij afwezigheid van vloeistof reeds worden verwacht, indien er nl. molybdenium-ionen uit het molybdeniumoxyde in het rooster van de beschermende oxydehuid zouden worden opgenomen. Men kan aannemen dat een rooster dat Mo-ionen bevat niet stoichiometrisch zal zijn, aangezien Mo zeer gemakkelijk in verschillende valentietoestanden naast elkaar kan voorkomen. Dit wil zeggen dat in het rooster onbezette plaatsen zullen bestaan, welke een betrekkelijk gemakkelijk transport van metaal- of zuurstofionen mogelijk maken, terwijl anderzijds door uitwisseling tussen de molybdeniumionen van verschillende waardigheid ook een grote beweeglijkheid van electronen wordt gewaarborgd. Daar volgens de theoretische in-

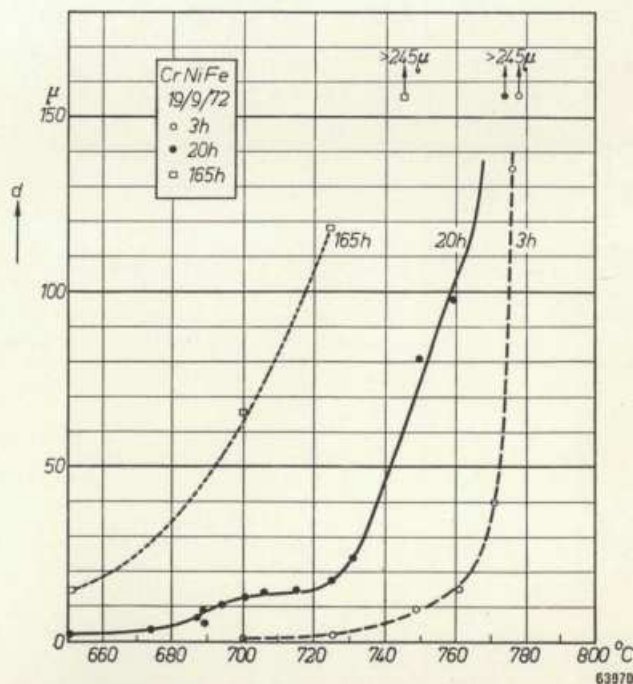


Fig. 8. Indringdiepte als functie van de gloeitemperatuur, bij aantasting van draden van CrNiFe 19/9/72 (roestvrij chroomnikkelstaal) door MoO_3 en lucht.

zichten, verkregen door het werk vooral van Wagner¹⁰⁾ en Mott¹¹⁾, bij de oxydatie van metalen en legeringen een diffusie door de oxydehuid van metaalionen en electronen afzonderlijk moet worden ondersteld, zien we in de oxydehuid met niet-stoechiometrisch rooster letterlijk de baan vrij voor een snelle oxydatie van het onderliggende metaal¹²⁾.

Het zou experimenteel heel moeilijk zijn een opneming van een gering percentage molybdenium-ionen in het rooster van de zeer dunne oxydehuid aan te tonen. In het hier beschouwde geval echter bleek de verandering, teweeggebracht door de aanwezigheid van het MoO_3 , veel krasser te zijn: röntgendiffractie-onderzoek van het materiaal van

de oxydehuid van de chroomijzerlegering CrFe 25/75 toonde dat, na 165 uur gloeien in MoO_3 en lucht op 650 °C, van de normaal te verwachten structuren (Cr_2O_3 en $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$) niets meer te bespeuren was, ook niet van Fe_3O_4 , FeO en dergelijke. Er werd uitsluitend een nieuwe structuur gevonden, waarvan het roostertype nog niet is opgehelderd, maar die blijkens een spectroscopische analyse behoort bij een oxyde dat voor het grootste deel uit molybdeniumoxyden bestaat (12% FeO of Fe_2O_3 , 6% Cr_2O_3 , rest Mo-oxyden). Al wat er aan oxydehuid aanwezig is, kan hier dus wegens de betrekkelijk gemakkelijke door-dringbaarheid geen doeltreffende bescherming van het metaal bieden.

Weer een ander mechanisme moet worden aangenomen om onze bevindingen bij de oxydatie van zilver en zilverlegeringen te verklaren. Proeven met zilvermonsters, ingepakt in MoO_3 -poeder, leverden bij ca 300 °C een merkbare indringdiepte, die tot 490 °C geleidelijk en bij nog hogere temperaturen sterk opliep; zie fig. 9. Op het eerste gezicht is de aantasting verrassend, omdat zilver, zoals in de inleiding werd vermeld, boven 150 °C in lucht van normale druk in het geheel niet kan oxyderen op thermodynamische gronden, nl. dank zij de grote dissociatiedruk van Ag_2O . Bij aanwezigheid van MoO_3 worden echter dubbeloxyden gevormd, zoals Ag_2MoO_4 , en deze hebben een aanzienlijk kleinere dissociatiedruk¹³⁾. Wij vonden dat Ag_2MoO_4 zelfs bij het smeltpunt, d.i. 570 °C, in lucht nog niet wordt ontleed. Het zilver gedraagt zich derhalve in aanwezigheid van MoO_3 als een onedel metaal, dat alleen door een oxydehuid tegen snelle oxydatie bij hoge temperaturen wordt beschermd. Dienovereenkomstig vinden wij in fig. 9, evenals in vroegere voorbeelden, de sterke toeneming van de oxydatie bij die temperatuur waarbij een eutecticum in de oxydehuid vloeibaar wordt (495 °C is de laagste eutectische temperatuur in het systeem Ag_2MoO_4 - MoO_3), en ten slotte ook een sterke oxydatie bij contact alleen met damp van MoO_3 , bij temperaturen waar de dampdruk van MoO_3 niet te klein is (750 °C). Men ziet dus dat, door de toevoeging van MoO_3 aan Ag_2O , de temperatuur waarbij de zuurstofdissociatiedruk $1/5$ atmosfeer te boven gaat met op zijn minst 600 °C is verhoogd. Het is mogelijk dat bij temperaturen boven 750 °C, waar wij niet hebben gewerkt, géén oxydatie van zilver in lucht en MoO_3 meer optreedt.

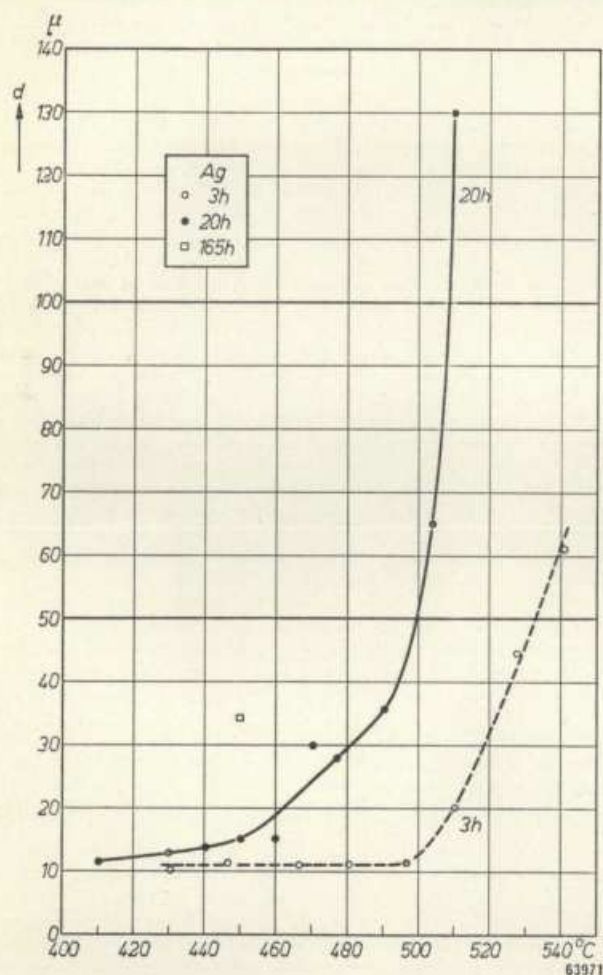


Fig. 9. Indringdiepte als functie van de gloeitemperatuur bij aantasting van voor 99,6% zuiver Ag door MoO_3 en lucht. De zilverdraden zijn vooraf 12 minuten gegloeid op 600 °C in een geheel zuurstofvrij en droog mengsel van stikstof en waterstof.

¹⁰⁾ C. Wagner, Z. phys. Chem. B 21, 25, 1933; 32, 447, 1936.

¹¹⁾ N. F. Mott, zie in N. Cabrera en N. F. Mott, Rep. on Progr. in Phys. 12, 163, 1949.

¹²⁾ En passant willen we hier nog even wijzen op het parallelisme tussen goede beschermende werking en slechte elektrische geleiding van de oxydehuid, dat hier naar voren komt: voor het laatste punt zie een artikel in dit tijdschrift van Verwey, Haayman en Romeyn: Philips techn. T. 9, 239, 1947.

¹³⁾ Voor analoge dubbeloxyden, bijv. van zilver met vanadium of met chroom, is iets dergelijks al langer bekend: R. Schenck, Z. anorg. allg. Chem. 249, 88, 1942.

Hoewel hiermee de oxydatie van zilver door MoO_3 bij hoge temperaturen begrijpelijk is gemaakt, blijft er nog een opmerkelijke bijzonderheid van deze oxydatie te verklaren, nl. de geringe temperatuurafhankelijkheid van de gemeten indringdiepte beneden de laagste eutectische temperatuur. Meten we in plaats van de indringdiepte het gewichtsverlies als functie van de temperatuur, dan blijkt de temperatuurafhankelijkheid beneden de laagste eutectische temperatuur veel sterker te zijn. Dit wijst er op dat de „temperatuur-ongevoelige” aantasting beneden 490°C , althans voor een groot deel, op interkristallijne penetraties moet berusten, die bij toenemende temperatuur niet veel in diepte doch vooral in aantal of in breedte toenemen. Dergelijke penetraties werden in microscopische praeparaten van draden die waren gegloeid beneden 490°C , inderdaad gevonden. (Boven 490°C zijn de penetraties nog sterker uitgesproken; zie fig. 10.)

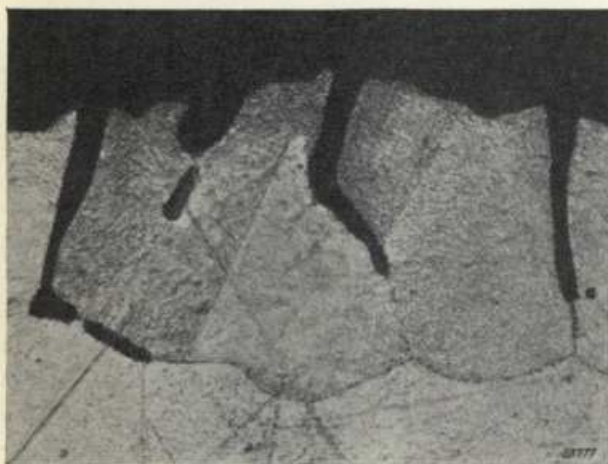


Fig. 10. Microfoto van de doorsnede van een blokje zilver (ongeveer 99,5% Ag), geoxydeerd door 20 uur gloeien op 530°C in MoO_3 en lucht. Er blijkt een sterke interkristallijne aantasting opgetreden te zijn, althans langs de grenzen van verschillende korrels. Op de rechte grenzen, die tweeling-gedeelten van een korrel scheiden en waar de kristallijne structuren rechts en links precies aan elkaar passen, is de grensvlakenergie zeer klein, zodat hier de (bij 495°C gevormde) vloeistof niet binnendringt. Ook deze tweelinggrenzen zijn goed zichtbaar geworden door etsen van het praeparaat met $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2$. Vergroting $500\times$.

Zulk een penetratie, bij temperaturen waarbij nog geen vloeistof optreedt en waarbij de dampdruk van MoO_3 geheel verwaarloosbaar is, is moeilijk te begrijpen. Wellicht moeten we ons voorstellen dat door de reactie van Ag en MoO_3 in de vaste toestand en de daarmee gepaard gaande volumeveranderingen sterke mechanische spanningen in de zilverkristallen optreden, die breuk langs korrelgrenzen doen plaats hebben. Een dergelijk aantastingsmechanisme zou tamelijk onafhankelijk van de temperatuur moeten zijn, doch het zou sterk moeten afhangen van kleine, op de korrelgrenzen

aanwezige verontreinigingen. Hiermee houdt waarschijnlijk verband het feit dat deze aantasting bij zilver sterker bleek te zijn naarmate het zilver minder zuiver was.

De drie hier besproken effecten: vorming van een vloeistof, vorming van een niet-stoichiometrisch oxyde-rooster, en verschuiving van een thermodynamisch dissociatie-evenwicht, zullen wellicht de hand hebben in vele, tot nu toe raadselachtig gebleven gevallen van corrosie van hittebestendige legeringen bij aanwezigheid van vreemde stoffen. Dit neemt natuurlijk niet weg dat er nog andere mechanismen van belang kunnen zijn. Bij alle door de schrijvers onderzochte gevallen van oxydatie van legeringen echter waren de drie genoemde mechanismen voldoende om de optredende verschijnselen in grote trekken bevredigend te verklaren.

Samenvatting. Legeringen die door een dichte oxydehuid tegen corrosie worden beschermd en hierdoor als hittebestendige constructiematerialen kunnen dienen, vertonen soms een sterk versnelde oxydatie indien zij in contact komen met vreemde stoffen, vooral vreemde oxyden. Ter opheldering van dit verschijnsel is de oxydatie van een reeks metalen en legeringen, o.a. met koper, ijzer en zilver als basis, onderzocht voor het geval deze in contact worden gebracht met molybdenumoxyde (MoO_3 , in poedervorm). De mate van oxydatie („indringdiepte”) werd bepaald door meting van de breekkracht van draadjes uit het desbetreffende materiaal, die al dan niet in contact met MoO_3 in lucht waren gegloeid. Bepaalt men de oxydatie aldus als functie van de temperatuur, dan krijgt men een kromme met één of meer discontinuïteiten, waar de oxydatie plotseling in versneld tempo gaat verlopen. Deze discontinuïteiten blijken te liggen bij de eutectische temperaturen van de systemen van de betrokken oxyden (laagste temperaturen waarbij vloeistofvorming optreedt). Hieruit kan worden geconcludeerd dat de versnelde oxydatie te wijten is aan een vloeistofvorming in de beschermende oxydehuid van de legering. De versnellende werking van de vloeistof op de oxydatie is goed te begrijpen, en uitgaande van het gevonden verband kunnen ook vele bijzonderheden in het temperatuur- en in het tijdsverloop van de oxydatie worden verklaard. In sommige gevallen kunnen oxyden van het basismetaal die niet essentieel tot de beschermende huid behoren, bijv. Cu_2O in het geval van aluminiumbrons, in belangrijke mate tot verlaging van de eutectische temperatuur bijdragen. Soms wordt bij aanwezigheid van MoO_3 ook beneden de laagste eutectische temperatuur reeds een merkbare oxydatie gevonden. Deze wordt verklaard door de opneming van molybdenum-ionen in het kristalrooster van de oxydehuid en de daarmee gepaard gaande verhoogde beweeglijkheid van elektronen en metaal- of zuurstof-ionen. Een derde manier waarop MoO_3 een oxydatie kan bevorderen, wordt bij zilver gevonden. Zilver is, als een edel metaal, boven 150°C in lucht van normale druk niet oxydeerbaar, doch bij aanwezigheid van MoO_3 kunnen dubbeloxyden worden gevormd, die de oxydatie nog bij veel hogere temperaturen mogelijk maken; dan doen ook hier smeltverschijnselen in de oxydehuid hun invloed gelden.

BESCHOUWINGEN OVER HET REGELEN VAN INDUSTRIËLE PROCESSEN

door H. J. ROOSDORP.

621-52

Regelmechanismen voor industriële processen kunnen van zeer uiteenlopende aard zijn: men denke bijv. aan de reeds op de oudste stoommachines voorkomende reguleur, die het toerental constant moet houden, aan spannings- en frequentieregelaars voor elektrische generatoren, aan temperatuurregelaars, die in de chemische industrie, bij destillatie- en kraakprocessen in de petroleumindustrie en bij het conserveren van levensmiddelen, van het grootste belang zijn. Al deze schijnbaar zo verschillende inrichtingen hebben als principe dit gemeen dat de constant te houden grootte via een regelaar terugwerkt op een regelende grootte, waarvan de eerstgenoemde grootte afhankelijk is.

Het is de bedoeling, op het onderstaande artikel, dat over zulke regelprocessen algemene beschouwingen geeft, andere te laten volgen, die resp. zullen handelen over een soort elektronische rekenmachine voor regelvraagstukken en over een uitgeverkte regelapparatuur.

Bij de meeste industriële processen is het noodzakelijk, een fysische grootte, bijv. een temperatuur, een druk, een doorstroomsnelheid, een zuurgraad, een geleidingsvermogen, met een zekere nauwkeurigheid op een bepaalde waarde te houden. Hiertoe is in de eerste plaats nodig dat men beschikt over een stuurorgaan, van welks stand de constant te houden grootte afhangt, bijv. de gaskraan van een met gas gestookte oven waarin de temperatuur constant moet blijven. In de eenvoudigste gevallen kan men er mee volstaan het stuurorgaan te zetten in een bepaalde stand, die men tevoren, op grond van theoretische overwegingen of van praktische ervaring, heeft vastgesteld (fig. 1). Daarbij moet men bij voorbaat zo goed mogelijk rekening houden met het te verwachten verloop van alle factoren die op de te regelen grootte van invloed zijn. In het geval bijv. van de zoëven genoemde oven zijn zulke factoren: de

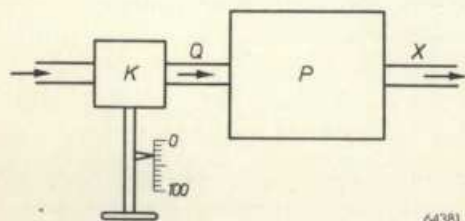


Fig. 1. Om bijv. een met gas gestookte oven P op een bepaalde temperatuur te brengen, kan men met een kraan K de gasstroom Q tevoren eens voor al zo instellen dat de temperatuur X zo goed mogelijk de gewenste waarde aanneemt en behoudt. Er is hier geen terugwerking van de uitgangsgrootte X op de ingangsgrootte Q (open circuit).

vulling van de oven, de gasdruk, de omgevings-temperatuur, enz. Tijdens het verloop van het „proces” — in dit geval de warmte-ontwikkeling in de oven — bestaat hier geen terugwerking van

de temperatuur in de oven op de stand van de gaskraan. Voor naderhand onverwachts optredende veranderingen in de bedrijfsomstandigheden, die op de temperatuur invloed hebben, wordt tijdens het in gang zijn van het proces niet meer gecorrigeerd. „Regeling” — als men het nog zo wil noemen — blijft in dit open circuit dus beperkt tot het tevoren doen van een zo goed mogelijke keuze van de stand van het stuurorgaan.

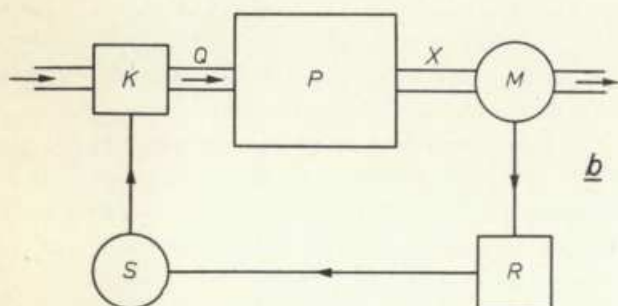
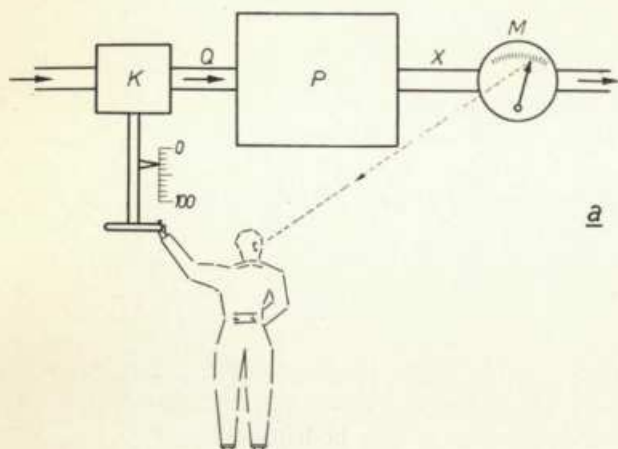
Anders is het bij een gesloten circuit (fig. 2). Daar wordt de te regelen grootte voortdurend gemeten, en uit deze waarneming wordt afgeleid hoe het stuurorgaan moet worden versteld om de gewenste toestand te bereiken, resp. te handhaven. Slechts dit zal in het vervolg regelen worden genoemd. Er bestaat daarbij derhalve een voortdurende terugwerking (terugkoppeling) — die het circuit maakt tot een gesloten circuit — van de uitgang van het proces op de ingang. Deze terugkoppeling kan tot stand komen door een menselijke waarnemer (handregeling, fig. 2a) of door een automatische regelaar (automatische regeling, fig. 2b).

In het volgende zullen wij ons alleen bezig houden met gesloten circuits met automatische regelaars.

Nauwkeurigheid en stabiliteit

Een regelinstallatie zou ideaal zijn indien ze zo werkte dat de te regelen grootte nimmer van de gewenste waarde zou afwijken, ondanks het optreden van storende, meestal onbeheersbare, variaties in allerlei bedrijfsomstandigheden, welke variaties, bij afwezigheid van de regelaar, ontoelaatbare grote invloed op het proces zouden hebben. Wenst men over te gaan op een andere waarde van de te regelen grootte, dan moet men iets aan de regelaar verstellen;

het behoort ook tot de eigenschappen van een ideale regelinstallatie dat de te regelen grootte de verstelling — die eveneens als een verstoring van de bestaande waarde van de grootte kan worden opgevat — onmiddellijk volgt.



64382

Fig. 2. Gesloten regelcircuits. De te regelen uitgangsgrootte X wordt gemeten door een meter M . Naar gelang van de grootte der afwijkingen van de gewenste waarde van X wordt de ingangsgrootte Q , door middel van het stuurorgaan K , bijgesteld, door tussenkomst van hetzij (a) een menselijke waarnemer, hetzij (b) een automatische regelaar R en een servomotor S .

Aan de beperkte gevoeligheid en aan de traagheid van diverse onderdelen van het circuit is het toe te schrijven dat een werkelijke regelinstallatie in geen van beide opzichten geheel aan het ideaal beantwoordt. Door de regelaar zeer gevoelig te maken kan men weliswaar bereiken dat reeds een minieme afwijking van de gewenste waarde een aanzienlijke verandering in de stand van het stuurorgaan teweegbrengt, maar door de traagheid van de opnemer (die de te regelen grootte meet), van de regelaar en van het stuurorgaan zelf bereikt dit laatste zijn nieuwe stand pas enige tijd na het optreden van de afwijking, en door de (dikwijls zeer aanzienlijke) traagheid van het proces sorteert deze verstelling pas nog weer later effect.

Er zal dus steeds na een storing — althans tijdelijk — een zekere discrepantie bestaan tussen de werkelijke en de gewenste waarde van de te regelen grootte. Wanneer een nieuwe stationnaire toestand is bereikt, dan kan in sommige gevallen deze discrepantie nul zijn geworden, dwz. het verschil tussen de beide waarden is dan geslonken tot binnen zekere grenzen, die o.a. worden gesteld door de meetgevoeligheid. In andere gevallen echter kan de discrepantie een zekere waarde behouden; men spreekt dan van statische onnauwkeurigheid, of ook wel van drift.

De discrepantie die, zoals gezegd, vóór het bereiken van de stationnaire toestand steeds aanwezig is, heet het overgangsverschijnsel. Men kan daarbij drie gevallen onderscheiden: 1) het aperiodieke geval, waarin het verschil, geleidelijk minder wordend, voortdurend hetzelfde teken houdt; 2) het gedempt periodieke geval, waarin het verschil volgens een gedempte trilling afneemt, en 3) het ongedempt periodieke geval, waarin het verschil tussen bepaalde grenzen blijft schommelen zonder uit te sterven.

De belangrijkheid van de statische onnauwkeurigheid is onmiddellijk duidelijk: zij geeft immers aan tot op welk bedrag, na een storing, de te regelen grootte de gewenste waarde (op den duur) benadert. Maar ook op het dynamische gedrag komt het aan: de na een storing aanvankelijk optredende afwijkingen van de gewenste waarde zouden namelijk bijv. een ontoelaatbaar grote amplitude kunnen maken, of het zou wel eens veel te lang kunnen duren voordat men van een nieuwe stationnaire toestand kan spreken. Het kan zelfs voorkomen dat er in het geheel geen eigenlijke stationnaire toestand intreedt, doordat telkens, voordat deze zou kunnen zijn ontstaan, de ingangsgrootte een nieuwe storing ondergaat, die zich ook doet gelden in de te regelen uitgangsgrootte. Als voorbeeld hiervan noemen we het geval van een drukregeling in een vat met gas, dat wordt aangevoerd door een zuigerpomp. Hierbij ontstaat een sterke pulsering in de gasdruk, met de frequentie van de pomp. Deze schommeling, waarvan eventueel de amplitude ontoelaatbaar groot kan zijn, heet de dynamische onnauwkeurigheid.

Aperiodieke en gedempt periodieke gevallen noemt men stabiel, ongedempt periodieke gevallen instabiel. We zullen later zien dat een bepaalde groep van regelaars (de zg. discontinu werkende regelaars) naar hun aard steeds een instabiele werking vertonen, zodat in de te regelen grootte onvermijdelijk een zekere schommeling aanwezig is. Indien zulk een schommeling ontoelaatbaar moet

worden geacht, dient men een zg. continu werkende regelaar te gebruiken, die, onder bepaalde omstandigheden, wel stabiel kan zijn.

Beide soorten van onnauwkeurigheid, alsmede (bij continu werkende regelaars) de stabiliteit en de demping, zijn de voornaamste punten waarop men in de regeltechniek moet letten. Zij hangen uiteraard af van de eigenschappen van de delen waaruit een gesloten circuit bestaat. Meestal is tevoren het proces gegeven en moet men de regelaar er bij aanpassen, zodanig dat de gewenste nauwkeurigheid en stabiliteit worden verkregen. Wilde men hierbij geheel de weg der berekening volgen, dan zou men in vele gevallen op onoverkomelijke moeilijkheden stuiten. Evenmin echter is het raadzaam, bij een reeds functionnerend proces de beste regelaar geheel langs empirische weg uit te zoeken, daar dit zou kunnen leiden tot langdurige storingen in de loop van het proces, met de daaraan verbonden achteruitgang van de hoeveelheid en de hoedanigheid der productie. Voor vele gevallen is daarom het bestuderen met behulp van een (electrisch) model de beste methode gebleken.

Het werken met een electrisch model

Bij het werken met een model kunnen de metingen aan het proces zelf beperkt blijven tot het opnemen van een responsiekarakteristiek, die het verloop van de te regelen uitgangsgrootte als functie van de tijd weergeeft indien de ingangsgrootte volgens een bepaalde tijdfunctie, bijv. een sprong, wordt veranderd. Vervolgens construeert men een electrisch netwerk waarvan de responsiekarakteristiek, op een andere tijdschaal, zo goed mogelijk met die van het proces overeenstemt. Dit netwerk doet verder dienst als model, waarvan men het gedrag, in combinatie met een model van de regelaar, rustig kan bestuderen zonder dat men in het werkelijke proces behoeft in te grijpen. Geleid door enig inzicht, doet men voor het model van de regelaar een keuze uit de verscheidene typen die mogelijk zijn.

De tijdschaal van het werkelijke proces en die van het electrische netwerk zijn in de regel zeer verschillend: een verandering die in het proces bijv. vele minuten nodig heeft, voltrekt zich in het netwerk in enige milliseconden. Periodieke herhaling van de sprong maakt het mogelijk, de responsiekromme van het netwerk, en ook het gedrag van het model met de regelaar, oscillografisch waar te nemen. Er is een toestel ontwikkeld, electro-analoog genaamd, waarin zijn bijeengebracht de nodige schakelelementen om ieder gewenst model te kunnen samenstellen,

benevens een oscillograaf, een generator van spanningsprongen en verder toebehoren. Volgende artikelen zullen aan de beschrijving van de electro-analoog zijn gewijd.

Heeft men, aldus te werk gaande, de parameters van het model van de regelaar zodanig gekozen dat het gunstigste effect wordt verkregen, dan is men — rekening houdend met de verhouding der tijdschalen en der gevoeligheden — in staat de waarden aan te geven die de overeenkomstige parameters in de werkelijke regelaar moeten hebben.

Een andere methode om het gedrag van een proces vast te leggen is het opnemen van de frequentiekarakteristiek. Hiertoe laat men de ingangsgrootte om een normale waarde heen met een constante amplitude sinusvormig schommelen, met een frequentie die men telkens een andere waarde geeft; men gaat dan na hoe groot de amplitude van de uitgangsgrootte is (in verhouding tot de amplitude van de ingangsgrootte), en welke fazeverschuiving tussen de schommelingen van de ingangs- en de uitgangsgrootte optreedt. De beide gemeten grootheden kunnen in ons geval het doelmatigst in een polair diagram worden verwerkt. Deze kromme, tezamen met de overeenkomstige kromme voor de regelaar, maakt het mogelijk de stabiliteit van het regelcircuit te beoordelen.

De sprongkarakteristiek geeft evenveel informatie als de frequentiekarakteristiek, maar heeft het voordeel dat het opnemen ervan veel vlugger en gemakkelijker in zijn werk gaat dan het opnemen van de frequentiekarakteristiek. Nemen we weer als voorbeeld een met gas verwarmde oven, dan verkrijgt men de sprongkarakteristiek door de gaskraan plotseling iets wijder of minder wijd open te zetten, en van dat ogenblik af, als functie van de tijd, de temperatuur in de oven te meten. Voor het opnemen van de frequentiekarakteristiek zou men de gastoevoer sinusvormig en met regelbare frequentie moeten variëren, en telkens, nadat zich een stationnaire toestand heeft ingesteld, de amplitude van de temperatuurschommeling en het fazeverschil met de schommelende gastoevoer moeten meten.

Een tweede voordeel van het werken met sprongkarakteristieken heeft betrekking op het samenstellen van het model waarin het gedrag van het proces moet worden nagebootst. Maakt men de sprongkarakteristiek van dit model op een oscillograaf zichtbaar, dan is het, door variëren van diverse netwerkparameters, niet moeilijk deze sprongkarakteristiek gelijkvormig te maken met die van het proces. Met deze gelijkvormigheid is dan de

analogie tussen model en proces bereikt. Overeenstemming van de frequentiekaracteristieken zou minder gemakkelijk oscillografisch zijn te constateren.

Tegenover deze voordelen van de sprongkarakteristiek staat echter, dat de in de praktijk voorkomende storingen meestal niet sprongvormig zijn, doch gewoonlijk een min of meer geleidelijk verloopend periodiek karakter vertonen, zodat het opnemen van de frequentiekaracteristiek nauwer aansluit bij de praktijk. Ook komen eigen trillingen van het proces dikwijls in de frequentiekaracteristiek duidelijker tot uitdrukking dan in de sprongkarakteristiek.

Tijdens het opnemen zowel van de sprong- als van de frequentiekaracteristiek moet men er op letten dat alle andere bedrijfsgr grootheden — in het geval van een oven bijv. de charge, de omgevingstemperatuur, enz. — constant blijven.

In het bovenstaande werd stilzwijgend aangenomen dat de amplitude van de aangebrachte schommeling der ingangsgrootheid, resp. de grootte van de sprong, er niet toe doet, dus dat het proces lineair is. Vaak echter kan het proces alleen voor kleine variaties met voldoende benadering als lineair worden beschouwd. Een volledig onderzoek zou ook het gedrag bij grotere amplituden moeten omvatten, en door het gebruik van niet-lineaire netwerkelementen zou de disproportionaliteit van het werkelijke proces zo goed mogelijk moeten worden nagebootst.

Een eventuele afwijking van de lineariteit kan worden beoordeeld, ten eerste door de ingangsgrootheid van het proces sinusvormig te variëren en na te gaan in hoeverre dan de uitgangsgrootheid niet-sinusvormig varieert, en, ten tweede, door na te gaan in hoeverre er onevenredigheid bestaat tussen sprongen van verschillende grootte aan de ingang en aan de uitgang.

Wij willen echter in deze beschouwingen van niet-lineaire effecten afzien.

Het is ten slotte — in theorie althans — ook mogelijk, het regelprobleem mathematisch te behandelen. Om daartoe de nodige vergelijkingen op te schrijven, is het doelmatig, onder Q te verstaan de stand van het stuurorgaan, en onder X de uitslag van de meter die de te regelen grootte meet. Dit zal trouwens ook bij het opnemen van de sprong- of van de frequentiekaracteristiek praktisch blijken te zijn.

Dat deze definitie enigszins afwijkt van die volgens fig. 2, wordt duidelijk als men weer denkt aan het voorbeeld van de met gas gestookte oven. Door traagheid van de opnemer zal de stand van de meter (nu X genoemd) niet geheel overeenkomen met de op hetzelfde ogenblik heersende temperatuur, die aanvankelijk met X werd aangeduid, en de gasstroom (Q in fig. 2) hangt weliswaar af van de nu met Q aangegeven stand van de gaskraan, doch ook van grootheden als de druk

in de toevoerleiding. De nieuwe definitie komt er op neer, dat de opnemer en het stuurorgaan worden gerekend als te behoren tot het proces.

In de betrekking tussen Q en X , zullen in het algemeen ook differentiaalquotienten naar de tijd t optreden:

$$f_1\left(Q, \frac{dQ}{dt}, \frac{d^2Q}{dt^2}, \dots, X, \frac{dX}{dt}, \frac{d^2X}{dt^2}, \dots\right) = 0. \quad (1)$$

(Geeft men Q een sprongsgewijs of een sinusvormig verloop met de tijd, dan is uit deze vergelijking de sprongkarakteristiek, resp. de frequentiekaracteristiek, af te leiden.) Voor de regelaar kan men eveneens een betrekking tussen Q en X opschrijven:

$$f_2\left(Q, \frac{dQ}{dt}, \frac{d^2Q}{dt^2}, \dots, X, \frac{dX}{dt}, \frac{d^2X}{dt^2}, \dots\right) = 0. \quad (2)$$

Verenigt men het proces en de regelaar tot een gesloten circuit (fig. 2b), dan mogen (1) en (2) worden gecombineerd. Uit deze vergelijkingen en de beginvoorwaarden kan men, althans in theorie, X en Q oplossen, die men dan vindt als functies van de tijd:

$$X = f_3(t), \quad \dots \quad (3)$$

$$Q = f_4(t) \quad \dots \quad (4)$$

Uit de kromme die (3) grafisch voorstelt kan men nagaan of de regeling stabiel is en of ze voldoende nauwkeurig is, dus bijv. of X inderdaad binnen gestelde grenzen blijft, dan wel, bij overschrijding van de grenzen, er voldoende snel binnen terugkeert. Uit de grafiek van (4) kan men zien of de nodige variatie van Q valt binnen het gebied dat door het stuurorgaan wordt bestreken.

In werkelijkheid echter is het oplossen van X en Q uit (1) en (2) meestal niet gemakkelijk ten uitvoer te brengen. Het is dan het elektrische model dat uitkomst brengt: aan dit model kan men gemakkelijk het verloop van de uitgangs- en de ingangsspanning met de tijd waarnemen en de invloed van het wijzigen van bepaalde parameters nagaan. Hierbij kan men op een geschikte plaats in het circuit een storing aanbrengen, hetzij een sprongvormige, hetzij een sinusvormige storing. In dit laatste geval zal men de frequentie bij voorkeur zodanig kiezen dat ze — de verhouding der tijdschalen in rekening gebracht zijnde — overeenkomt met de frequentie der in de praktijk voorkomende storingen.

De kwaliteit van een regelinstallatie laat zich beoordelen van verschillende standpunten uit.

Soms kan men eenvoudig volstaan met te letten op de grootste afwijking die in de uitgangsgrootte door een ergens aangebrachte storing van bepaalde grootte wordt teweeggebracht. In andere gevallen komt het meer aan op de tijd die nodig is om na een bepaalde storing de uitgangsgrootte blijvend binnen bepaalde grenzen te doen terugkeren; zie

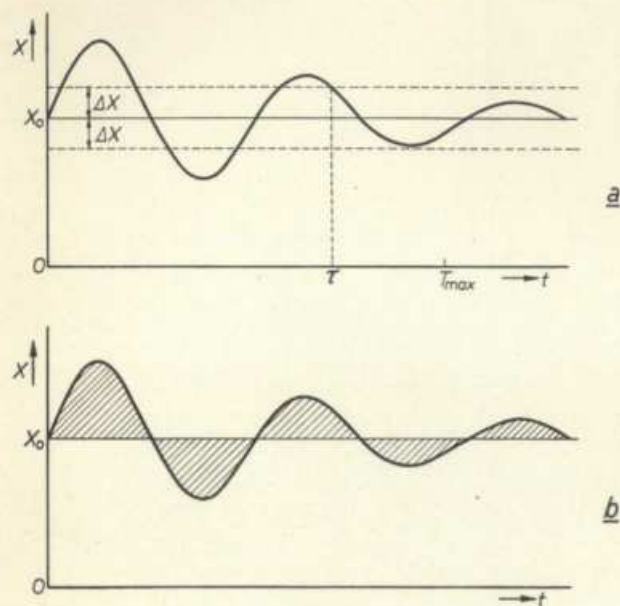


Fig. 3. Twee criteria voor de dynamische onnauwkeurigheid van een regelinrichting. Bij (a) is als criterium genomen dat de tijd τ die de te regelen grootte X nodig heeft om blijvend tussen de grenzen $X_0 - \Delta X$ en $X_0 + \Delta X$ terug te keren, kleiner moet zijn dan een bepaalde tijd $T_{\max}$. Bij (b) wordt verlangd dat de gearceerde oppervlakte een bepaalde waarde niet te boven gaat.

fig. 3a. Is een langdurige kleine afwijking in principe even ongewenst als een grote afwijking van korte duur, dan kan men bijv. als criterium nemen dat de in fig. 3b gearceerde oppervlakte,

$$\int_0^{\infty} |X - X_0| dt,$$

waarin X_0 de gewenste waarde van X voorstelt, of ook wel de integraal

$$\int_0^{\infty} (X - X_0)^2 dt,$$

beneden een zekere waarde blijft. Men maakt geen noemenswaardige fout indien men de integratie slechts uitstrekt over een tijd T die zo lang is dat daarin X nagenoeg constant is geworden; de over T uitgestrekte waarden van de integralen laten zich dan in het model gemakkelijk electrisch meten, de eerste met behulp van een gelijkrichter en een draaispoelmeter, de tweede met een thermokoppel en een draaispoelmeter.

Typen van regelaars

De betrekking (2) drukt uit hoe de uitgangsgrootte van de regelaar afhangt van de ingangsgrootte. In principe is men nog geheel vrij in het kiezen van deze betrekking, maar in de praktijk is men beperkt tot functies die zich gemakkelijk met mechanische of electrische schakelementen laten verkrijgen. Hieronder volgt een overzicht van de gebruikelijkste combinaties.

Deze zijn te verdelen in twee hoofdgroepen: continu en discontinu werkende regelaars. Daar discontinue regelaars in uitvoering het eenvoudigst zijn en daarom in de regeltechniek het eerst ingang hebben gevonden (temperatuurregeling van ovens, van centraal verwarmde gebouwen, e.d.), bespreken we deze het eerst.

Discontinue regelaars

Een regelaar wordt discontinu genoemd als het stuurorgaan, wanneer X een bepaalde kritische waarde passeert, discontinu een andere stand aanneemt.

Beschouwen we eerst het geval dat alle bedrijfsomstandigheden normaal zijn. Laat Q_0 de waarde van Q zijn die daarbij nodig is om X de gewenste waarde X_0 te geven. In het eenvoudigste geval is het stuurorgaan zo ingericht dat de stand Q_0 niet mogelijk is; slechts twee standen zijn namelijk mogelijk: $Q_1 (< Q_0)$ en $Q_2 (> Q_0)$. Q_1 behoort volgens de procesvergelijking bij een waarde van X kleiner dan X_{cr} , Q_2 bij een waarde van X groter dan X_{cr} . De regelaar reageert op de grootte van X zodanig dat men heeft: of $X > X_{cr}$, $Q = Q_1$, of $X < X_{cr}$, $Q = Q_2$. Men spreekt dan van een regeling met twee standen (fig. 4). Uiteraard is zulk een regelaar steeds instabiel. Immers, als X bijv. te groot is ($X > X_{cr}$) gaat het stuurorgaan in de stand $Q_1 < Q_0$ staan; Q is dus te klein geworden, zodat X na enige tijd ook te klein wordt, waardoor het stuurorgaan weer in de stand Q_2 komt te staan en X weer groter

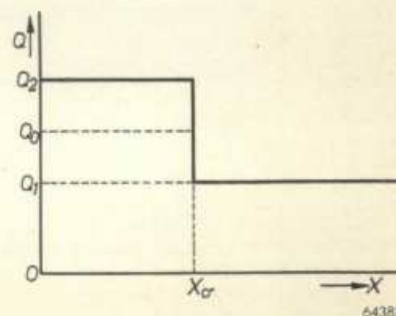


Fig. 4. Regeling met twee standen. Als X groter is dan een zekere kritische waarde X_{cr} , heeft Q de waarde Q_1 ; is X kleiner dan X_{cr} , dan is $Q = Q_2$.

wordt, enz. X schommelt dus voortdurend om de waarde X_{cr} heen, en het stuurorgaan staat afwisselend in de standen Q_1 en Q_2 . In het algemeen zal men er naar streven de gemiddelde waarde van X gelijk te maken aan de gewenste waarde X_0 . In een bepaalde bedrijfstoestand kan X_{cr} gelijk zijn aan X_0 (zie het gedeelte van fig. 5 tussen $t = 0$ en $t = t_0$).

Beschouwen we nu het geval dat een van de bedrijfsomstandigheden zich wijzigt, of dat men de regelaar zo verstelt dat het stuurorgaan verspringt bij een andere kritische waarde, X_{cr}' (zie fig. 5 rechts van t_0). De enige manier waarop de regelaar op de nieuwe toestand kan reageren, is een wijziging in de verhouding der intervallen waarin het stuurorgaan in de twee mogelijke standen staat. Daar X_{cr}' groter is ondersteld dan de oorspronkelijke waarde X_{cr} , moet het stuurorgaan nu langer verblijven in de hoge stand Q_2 dan in de lage stand Q_1 . De nieuwe waarde X_0' waar X nu omheen gaat slingeren, is hoger geworden, doch blijft, zoals uit de figuur is te zien, lager dan de nieuwe instelling van de regelaar, X_{cr}' .

Men kan een regeling met twee standen uitbreiden tot een met drie standen, die werkt volgens dit schema:

$$\begin{aligned} X > X_2, & \quad \text{dan } Q = Q_1 (< Q_0), \\ X_1 < X < X_2, & \quad \text{dan } Q = Q_0, \\ X < X_1, & \quad \text{dan } Q = Q_2 (> Q_0). \end{aligned}$$

Dit heeft het voordeel dat de regelaar niet hoeft in te grijpen zolang X verblijft tussen de grenzen X_1 en X_2 , zodat bij weinig veranderende bedrijfsomstandigheden het stuurorgaan lange tijd achtereen in rust blijft. Het is daardoor minder onder-

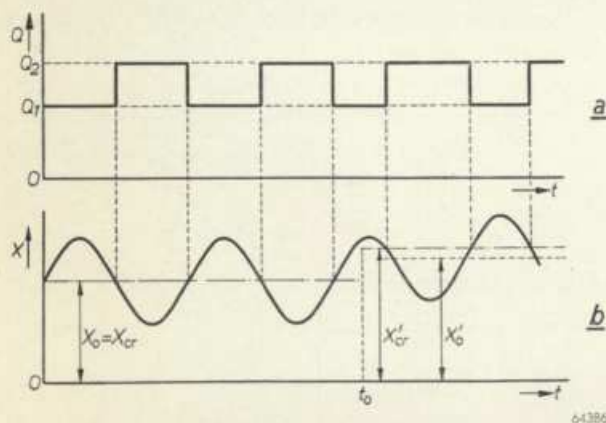


Fig. 5. Verloop van Q en X in een regelinrichting met twee standen. Vóór t_0 was X_{cr} gelijk aan de gewenste waarde X_0 , waar X omheen slingert, en Q had beurtelings, en gedurende even lange intervallen, de waarde Q_1 en de waarde Q_2 . Bij t_0 wordt X_{cr} vergroot tot de waarde X_{cr}' , ten gevolge waarvan Q telkens langer de waarde Q_2 heeft dan de waarde Q_1 . De waarde X_0' waar X omheen gaat slingeren, is kleiner dan X_{cr}' .

hevig aan slijtage dan in het geval van de rusteloze regeling met twee standen.

In plaats van bij bepaalde waarden van X de grootte Q zelf te laten verspringen, kan men ook de snelheid waarmee Q verandert, dus dQ/dt , een andere waarde laten aannemen. Men spreekt dan van een regeling met twee (of meer) snel-

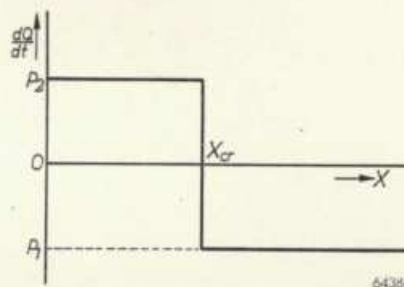


Fig. 6. Regeling met twee snelheden. Passeert X de kritische waarde X_{cr} , dan verspringt de snelheid dQ/dt waarmee het stuurorgaan wordt bijgesteld, van de waarde p_1 naar de waarde p_2 , of omgekeerd. p_1 en p_2 hebben tegengesteld teken.

heden. In fig. 6 is het geval van twee snelheden, p_1 en p_2 , grafisch voorgesteld. Zoals men gemakkelijk inziet, moeten p_1 en p_2 tegengesteld teken hebben. Voor het geval van drie snelheden zou het schema luiden:

$$\begin{aligned} X > X_2, & \quad \text{dan } dQ/dt = p_1 < 0, \\ X_1 < X < X_2, & \quad \text{dan } dQ/dt = 0, \\ X < X_1, & \quad \text{dan } dQ/dt = p_2 > 0. \end{aligned}$$

Dit soort regelingen vormt een overgang naar de continue regelingen.

Continue regelaars

De eenvoudigste continue regeling is de proportionele regeling. Hierbij neemt (2) de volgende eenvoudige vorm aan:

$$Q = a(X - X_0) + Q_0, \dots \dots (5)$$

waarin a een constante is. Q_0 is de stand die het stuurorgaan moet hebben, opdat in verband met de eigenschappen van het proces (verg. (1)) de stationnaire toestand zich instelt bij de waarde $X = X_0$.

Bij een storing, die neerkomt op een verandering van de procesvergelijking, zal in het algemeen Q een andere waarde moeten krijgen om het proces weer tot $X = X_0$ te doen leiden. Dit is echter — volgens (5) — alleen mogelijk indien men Q_0 wijzigde. Laat men Q_0 onveranderd, dan moeten Q en $a(X - X_0)$ met eenzelfde bedrag veranderen, dus zal X in de nieuwe toestand verschillen van X_0 . Dit verschil is de statische onnauwkeurigheid

van de regelaar. Het is des te kleiner naarmate de grootte a , de gevoeligheid van de regelaar, groter is. Aan het opvoeren van a wordt echter een soortgelijke grens gesteld als aan het opvoeren van de versterking van een teruggekoppelde versterker: van een zekere waarde af ontstaan oscillaties, anders gezegd: er treedt instabiliteit in.

Wat de statische onnauwkeurigheid betreft, is het anders gesteld bij een zg. integrerende regeling. Tussen Q en X bestaat voor de regelaar dan een betrekking van de volgende vorm:

$$Q = b \int (X - X_0) dt + Q_0, \dots (6a)$$

dus
$$\frac{dQ}{dt} = b (X - X_0), \dots (6b)$$

waarin b een constante is. Hierbij is dus de snelheid waarmee het stuurorgaan wordt versteld, evenredig met de afwijking die de meteruitslag vertoont ten opzichte van de gewenste waarde X_0 . Zolang deze afwijking nog niet nul is geworden, blijft $\int (X - X_0) dt$ toenemen, blijft dus het stuurorgaan zich bewegen in de richting die een correctie van de afwijking bewerkstelligt, totdat ten slotte $X = X_0$ is geworden. De statische onnauwkeurigheid is hier dus nul. De eindtoestand ($X = X_0$) wordt des te sneller benaderd naarmate b groter is. Ook aan het opvoeren van deze coëfficiënt echter wordt een grens gesteld door het optreden van instabiliteit.

Behalve combinaties van proportionele en integrerende regeling:

$$Q = a(X - X_0) + b \int (X - X_0) dt + Q_0,$$

komen ook combinaties voor van elk dezer regelingen, of van beide, met een derde type: de differentiërende regeling, waarbij aan de betrekking tussen Q en X in het rechterlid een term $c dX/dt$ moet worden toegevoegd. Deze term geeft tot

de verstelling van het stuurorgaan een bijdrage die evenredig is met de snelheid waarmee X bezig is van de goede waarde af te wijken (of deze te naderen). Ze levert in het algemeen een snellere benadering van de eindtoestand, doordat bij de andere termen grotere waarden van a en/of b kunnen worden gekozen zonder dat de regeling instabiel dreigt te worden.

In principe zou men regelaars kunnen samenstellen waarvan de betrekking tussen Q en X ook hogere afgeleiden of meervoudige integralen van X bevat, maar voor industriële doeleinden blijkt hieraan in de praktijk weinig behoefte te bestaan.

Opgemerkt zij nog dat het integreren en het differentiëren met zeer goede benadering langs elektrische weg kunnen worden uitgevoerd, hetgeen dan ook in het elektrische model van een continue regelaar geschiedt. In vele gevallen heeft het voordelen, ook de regelaar zelf uit te voeren als een elektrisch apparaat, zoals uit een volgend artikel zal blijken. Daaraan voorafgaand zal een tweetal artikelen worden gewijd aan de electro-analoog, waarin de werking van verschillende regelsystemen met oscillogrammen zal worden toegelicht.

Samenvatting. In deze inleidende beschouwingen over regelmechanismen voor industriële processen wordt de nadruk gelegd op de statische en de dynamische onnauwkeurigheid, de stabiliteit en de demping als de voornaamste punten waarop men bij het ontwerpen van een regelinrichting moet letten. Besproken worden de voordelen van het werken met een elektrisch model van het te regelen proces en van de bijbehorende regelaar; aan dit model kunnen de verschijnselen oscillografisch worden waargenomen. De regelaars worden verdeeld in discontinu en continu werkende regelaars. In deze laatste kunnen, in verschillende verhoudingen, een proportioneel, een integrerend en een differentiërend effect worden aangebracht.

Volgende artikelen zullen zijn gewijd aan een bespreking van de "electro-analoog" — een verzameling instrumenten waarmede „analoge” modellen van willekeurige te regelen processen inclusief regelaars kunnen worden samengesteld en bestudeerd —, alsmede aan een uitgevoerde regelaar.

DE NAUWKEURIGE IJING VAN STEMVORKEN

door C. C. J. ADDINK.

681.831.3:534.321.71:534.63

De invoering in de muziek van de frequentie 440 Hz voor de stemtoon a^1 , in plaats van 435 Hz, brengt nog steeds, door het ontbreken van goede normalen, moeilijkheden met zich mee. De in de praktijk gebruikte stemvorken laten namelijk nog vrij veel te wensen over. Vandaar de hernieuwde belangstelling voor nauwkeurig geijkte stemvorken.

Een in 1939 in Londen gehouden internationale conferentie heeft aan lichamen als het Comité Consultatif International Téléphonique, de International Electrotechnical Commission en de Union Internationale de Radiodiffusion, benevens aan de onderscheidene nationale normalisatiecommissies, aanbevolen, de frequentie van de stemtoon a^1 vast te stellen op 440 Hz — in afwijking van de waarde 435 Hz, die in 1885 te Wenen internationaal was aanvaard — en bij alle muziekuivoeringen deze waarden binnen zo nauw mogelijke grenzen te doen aanhouden¹⁾. In de praktijk blijken de

¹⁾ Zie bijv.: Internationale Neufestsetzung des Stimmtones, Akustische Zeitschrift 4, 288, 1939.

gebruikelijke stemvorken weliswaar hoger te zijn gestemd dan 435 Hz, maar dikwijls, in positieve of negatieve richting, nog enige Hz van 440 Hz te verschillen. Daar er in dit laboratorium geen standaard van 440 Hz aanwezig was, is als eerste stap om hiertoe te komen, een methode ontwikkeld om audiofrequenties rechtstreeks (dwz. door tellen van het aantal trillingen dat in een bepaalde tijd wordt uitgevoerd) en zeer nauwkeurig te meten. Met behulp van de volgens deze methode werkende apparatuur zijn niet alleen stemvorken van 440 Hz geijkt, maar ook meermalen een stel van 13 stemvorken die tezamen een getempereerde chromatische toonladder van één octaaf vormen (fig. 1). De

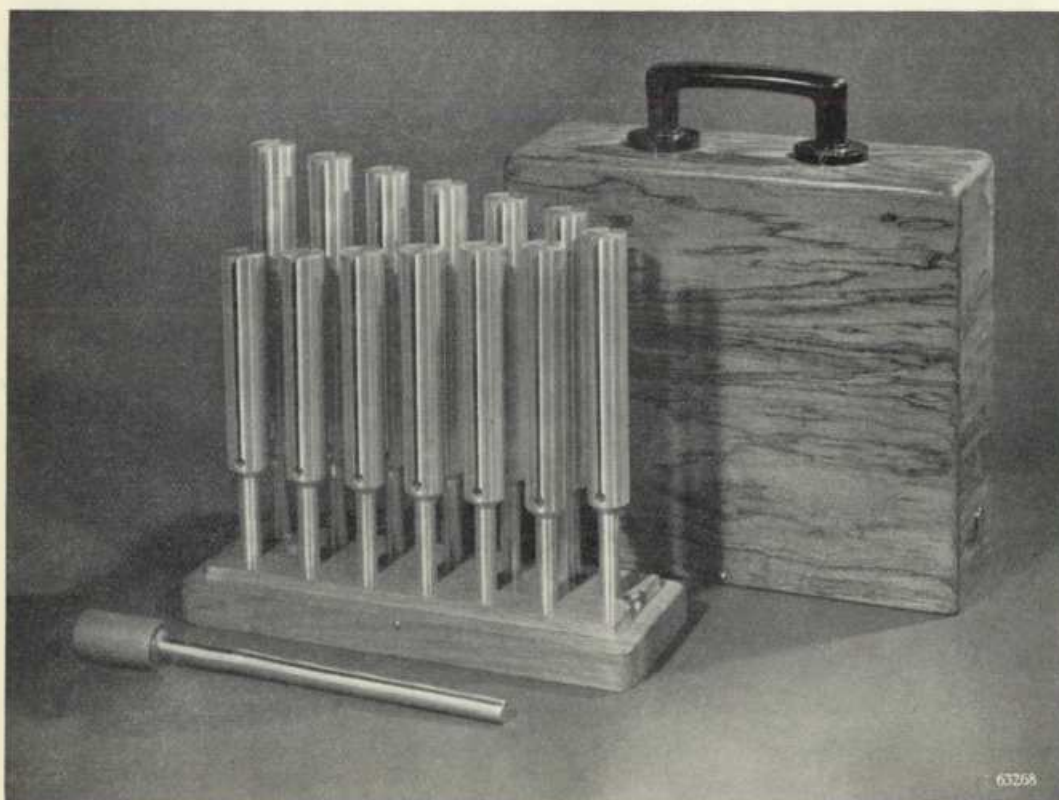


Fig. 1. Stel van 13, in het Philips-laboratorium vervaardigde, stemvorken. Zij vormen tezamen een chromatische toonladder in getempereerde stemming, van c^1 tot c^2 , met $a^1 = 440$ Hz. De reden waarom de cilindrische vorm is gekozen wordt toegelicht in de laatste paragraaf.

methode wordt in het volgende beschreven; vooraf echter willen wij de vraag behandelen welke nauwkeurigheid men van een stemvork mag verlangen.

Vereiste nauwkeurigheid van een stemvork

Een normale stemvork heeft een bruikbare uitklinktijd van 5 tot 15 s. Indien men, bij het gewone gebruik, een muziekinstrument in toonhoogte met de stemvork vergelijkt, zal men in het algemeen zwevingen horen. Is echter het frequentieverschil zo klein dat er, in de genoemde uitklinktijd, nog maar twee of drie zwevingen ontstaan, dan kan men deze nauwelijks meer als zodanig waarnemen en is men dus aan de grens van de nauwkeurigheid van de stemvork gekomen. Het heeft derhalve geen zin, een grotere precisie te verlangen dan 0,2 Hz (één zweving in 5 s), met andere woorden: de frequentie van de stemvork moet liggen tussen de grenzen 439,8 en 440,2 Hz²⁾. (Deze nauwkeurigheid is echter alleen vereist voor muziekinstrumenten met een vaste stemming, zoals orgel, piano, harp, enz.) Het bepalen van de frequentie dient echter te geschieden met een grotere nauwkeurigheid, daar men bij de genoemde grenzen zeker moet zijn van de laatste decimaal. De toelaatbare meetfout bedraagt dus 0,05 Hz. Dit komt, bij 440 Hz, neer op een meetnauwkeurigheid van ongeveer 0,01 %.

Uit de genoemde nauwkeurigheid volgt, dat men, zowel bij de meting als bij het gebruik in de praktijk, rekening moet houden met de temperatuur. De temperatuuroëfficiënt van de frequentie bedraagt namelijk bij een stalen stemvork ongeveer $-1 \cdot 10^{-4}$ per °C, en bij de in fig. 1 afgebeelde, van een harde aluminiumlegering vervaardigde, vorken ongeveer $-2,5 \cdot 10^{-4}$ per °C.

Meetmethode

Zoals uit het bovenstaande al blijkt, zal men voor het ijken van een stemvork moeten omzien naar een nauwkeuriger methode dan het op het gehoor vergelijken met een standaardfrequentie. Daarbij komt nog dat men bij frequentieverschillen die kleiner zijn dan 0,1%, op het gehoor het teken van de fout niet meer kan waarnemen.

De door ons uitgewerkte ijkmethode komt in het kort op het volgende neer. Een hulposcillator wordt in frequentie gelijk gemaakt aan de te ijken stemvork, en vervolgens verbonden met een synchroon-

klok. Deze telt het aantal trillingen dat de hulposcillator in een bepaald tijdsverloop uitvoert. Deze tijd wordt gemeten met een goed lopend slingeruurwerk.

Gelijkstemmen van de hulposcillator

Wegens het gedempte karakter van de trilling is een stemvork niet geschikt om er zonder hulpmiddelen de frequentie voldoende nauwkeurig aan te meten. Weliswaar kan men een stemvork langs elektrische weg in trilling houden, doch tenzij men aan de uitvoering zeer veel zorg besteedt, verschilt de frequentie waarmee zij dan trilt, enigszins van de frequentie — om welke het te doen is — van de vrij trillende vork. Wat we voor het ijken dus nodig hebben, is een hulposcillator, die, eenmaal gelijk gestemd met de vrij trillende stemvork, de gezochte frequentie onbeperkt lang kan voortbrengen.

Voor zulk een oscillator is een zg. RC-oscillator, die slechts uit weerstanden, condensatoren en versterkbuizen bestaat, zeer geschikt. Bij juiste uitvoering, en nadat de oscillator in temperatuur-evenwicht is gekomen, kan de relatieve frequentieverandering, in het audiofrequente gebied, kleiner worden gehouden dan $1 : 10^5$ ³⁾.

Het gelijk maken van de frequentie van de oscillator aan die van de stemvork kan met voldoende nauwkeurigheid geschieden als men gebruik maakt van een kathodestraaloscillograaf, en aan het ene platenpaar de uitgangsspanning van de RC-oscillator, aan het andere paar een spanning met de stemvorkfrequentie legt. Deze laatste spanning kan men verkrijgen door de stemvork op te stellen bij een microfoon. Op het scherm van de oscillograaf verschijnt dan een bewegende Lissajous-figuur, die bij gelijkheid van de frequenties overgaat in een stilstaande ellips⁴⁾.

Een bezwaar van deze methode is, dat men aan de Lissajous-figuur het teken van het frequentieverschil niet kan zien. Men draait daardoor allicht de afstemknop van de oscillator eerst verkeerd om, doch vóór men dit heeft hersteld en frequentie-gelijkheid heeft bereikt, is de stemvork al uitgeklonken en moet men haar opnieuw aanslaan.

Dit bezwaar heeft men niet indien men als volgt te werk gaat. De uitgangsspanning van een RC-

³⁾ Zie bijv: E. L. Ginzton en L. M. Hollingworth, Phase-shift oscillators, Proc. Inst. Rad. Engrs. 29, 43-49, 1941; K. Bucher, RC-Generatoren, Telegr. Fernsprech-Techn. 31, 307-313, 1942.

⁴⁾ Bij deze en de hierna te beschrijven methode kan men met voordeel een oscillograaf gebruiken die twee versterkers bevat, één voor ieder platenpaar, zoals type GM 3159 of GM 5655 (Philips techn. T. 9, 202-210, 1947, resp. 11, 111-115, 1949 (No. 4)).

²⁾ Andere auteurs komen, langs een andere weg, tot dezelfde tolerantie: H. J. von Braunmühl en O. Schubert, Ein neuer elektrischer Stimmtongeber für 440 Hz, Akustische Zeitschrift 6, 299-303, 1941.

oscillator wordt rechtstreeks gelegd aan het ene paar ingangsklemmen van de oscillograaf, en tevens, doch na in een netwerk van weerstanden en condensatoren 90° in fase te zijn verschoven, aan het andere klemmenpaar (fig. 2). Op het scherm van de oscillograaf verschijnt dan — bij de juiste amplitudeverhoudingen van de beide ingangsspanningen — een cirkel.

De te ijken stemvork wordt opgesteld bij een microfoon, waarvan men de versterkte uitgangsspanning de straalstroom van de kathodestraalbuis laat moduleren, en wel zodanig dat de straalstroom alleen gedurende de positieve halve perioden van de microfoonspanning wordt doorgelaten. Men krijgt dus nog slechts een halve cirkel te zien (fig. 2). Deze halve cirkel staat stil indien de oscillatorfrequentie juist gelijk is aan de stemvorkfrequentie; bij ongelijkheid draait hij. Het is doelmatig het zo in te richten dat, indien de afstemknop van de oscillator rechtsom moet worden gedraaid om de frequentie te verhogen, de halve cirkel rechtsom draait bij iets te hoge, en linksom bij iets te lage frequentie van de oscillator. Het gelijkstemmen gaat nu zeer vlug in zijn werk, indien men de fijnregelknop van de oscillator draait in de richting tegengesteld aan die waarin de halve cirkel beweegt, tot deze stilstaat⁵⁾. (Gemakshalve werd hier gesproken van een halve cirkel. Voor het gelijkmaken van frequenties is deze vorm niet essentieel; men kan ook nog werken met een halve willekeurige ellips, dwz. de faseverschuiving in het netwerk behoeft niet precies 90° te zijn.)

Beschikt men over een spanningsbron met de standaardfrequentie (bijv. een elektrisch aangedreven stemvork, of de toon van 440 Hz, zoals die tegenwoordig regelmatig door de B.B.C. voor ijkdoeleinden wordt uitgezonden), dan kan men de te bepalen stemvorkfrequentie rechtstreeks vergelijken met de standaardfrequentie door middel van de schakeling volgens fig. 2, indien men hierin de RC-oscillator vervangt door de bron met standaardfrequentie. Men krijgt dan weer een draaiende halve cirkel te zien, en uit het aantal omwentelingen dat deze in een bepaalde tijd maakt, is op eenvoudige wijze de grootte van het frequentieverschil af te leiden (het teken volgt uit de draairichting). Men meet dus als het ware onderdelen van een zweeping. De nauwkeurigheid is evenredig met de waarnemingsduur, en reeds zeer groot bij de duur van de uitklinktijd. Maakt bijv. de halve cirkel $\frac{1}{4}$ omwenteling in 12,5 s, dan is het frequentieverschil 0,02 Hz.

⁵⁾ Deze methode is reeds eerder gebruikt, en wel voor het meten van de toonhoogte van muziekinstrumenten tijdens een muziekuitvoering (Balth. van der Pol en C. C. J. Addink, Philips techn. T. 4, 217-222, 1939, en Wireless World 44, 441-442, 1939). Hierbij kon men de oscillator — in dit geval een elektrisch in trilling gehouden, geijkte en in een klein frequentiegebied regelbare snaar — binnen één seconde tot op 0,2 Hz in frequentie gelijk maken aan de toon a^1 in de muziek. Voor het ijken van een stemvork echter is een in frequentie regelbare snaar niet nauwkeurig genoeg.

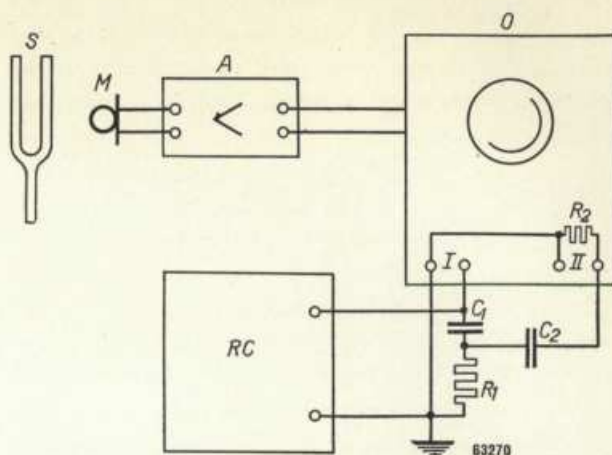


Fig. 2. Opstelling voor het gelijk maken van de frequentie van een RC-oscillator (RC) aan die van de te ijken stemvork (S). De uitgangsspanning van de oscillator wordt rechtstreeks gelegd aan de ingangsklemmen I van de kathodestraaloscillograaf O, en, via een 90° in fase verschuivend netwerk van weerstanden en condensatoren (R_1 , C_1 , R_2 , C_2), aan de ingangsklemmen II. De straalstroom van de kathodestraalbuis wordt gemoduleerd door de uitgangsspanning van een versterker (A), waarop een microfoon (M) is aangesloten, die het geluid van de stemvork opvangt.

Zoals in de figuur is aangegeven, kan R_2 de weerstand zijn die zich reeds in de oscillograaf tussen de klemmen II bevindt.

Meting van de oscillatorfrequentie met behulp van een klok

Op de, met de stemvork gelijkgestemde, RC-oscillator wordt nu een synchroonklok aangesloten, die is voorzien van een secondewijzer. Deze klok was in ons geval zodanig ingericht dat ze met de juiste snelheid zou lopen indien ze was aangesloten op een bron met de frequentie 1000 Hz. Wordt ze gedurende een tijd T_1 gevoed met een frequentie f , en verandert in die tijd haar aanwijzing met een bedrag T_2 , dan is

$$f = \frac{T_2}{T_1} \cdot 1000 \text{ Hz.}$$

T_1 wordt gemeten met een goed slingeruurwerk, waarvan de gang vóór en na de meting wordt gecontroleerd met radiotijdseinen, welke aldus de basis van de ijking vormen. Daar de secondewijzer van deze klok met sprongen van 1 seconde vooruitgaat, en men de beide klokken trouwens toch niet gelijktijdig met voldoende nauwkeurigheid zou kunnen aflezen, wordt een stophorloge te hulp geroepen, dat wordt afgedrukt wanneer de secondewijzer van het slingeruurwerk op een bepaalde deelstreep, bijv. 60, springt. Het horloge vormt van dat ogenblik af als het ware een verlengstuk — afleesbaar tot op 0,2 of 0,1 s nauwkeurig, al naar gelang de onrust 5 of 10 slingeringen per seconde maakt — van het slingeruurwerk. Zet men nu het horloge stil wanneer de continu draaiende

secondewijzer van de synchroonklok een bepaalde deelstreep passeert, dan had dit plaats op een tijdstip dat men vindt door bij de aflezing van het slingeruurwerk de stand van het stilgezette horloge op te tellen. De drie aflezingen (slingeruurwerk, synchroonklok en stophorloge) worden genoteerd.

Na een voldoende lange tijd gaat men een tweede maal op dezelfde manier te werk, en uit de genoteerde tijden volgen onmiddellijk T_1 en T_2 (zie onderstaand getallenvoorbeeld).

$0,4/10^{-4} = 4000$ s te zijn, dus ongeveer één uur. (Bij een tot op 0,1 s afleesbaar horloge kan men volstaan met de helft van deze tijd.)

Een beeld van de volledige ijkapparatuur geeft fig. 3.

Hieronder volgen enige aan een ijkking ontleende getallen, die een en ander zullen verduidelijken.

Het stophorloge werd afgedrukt toen het slingeruurwerk 2 h 37' 0'' aanwees, en stopgezet toen de secondewijzer van de synchroonklok een zekere deelstreep van de schaal passeerde,

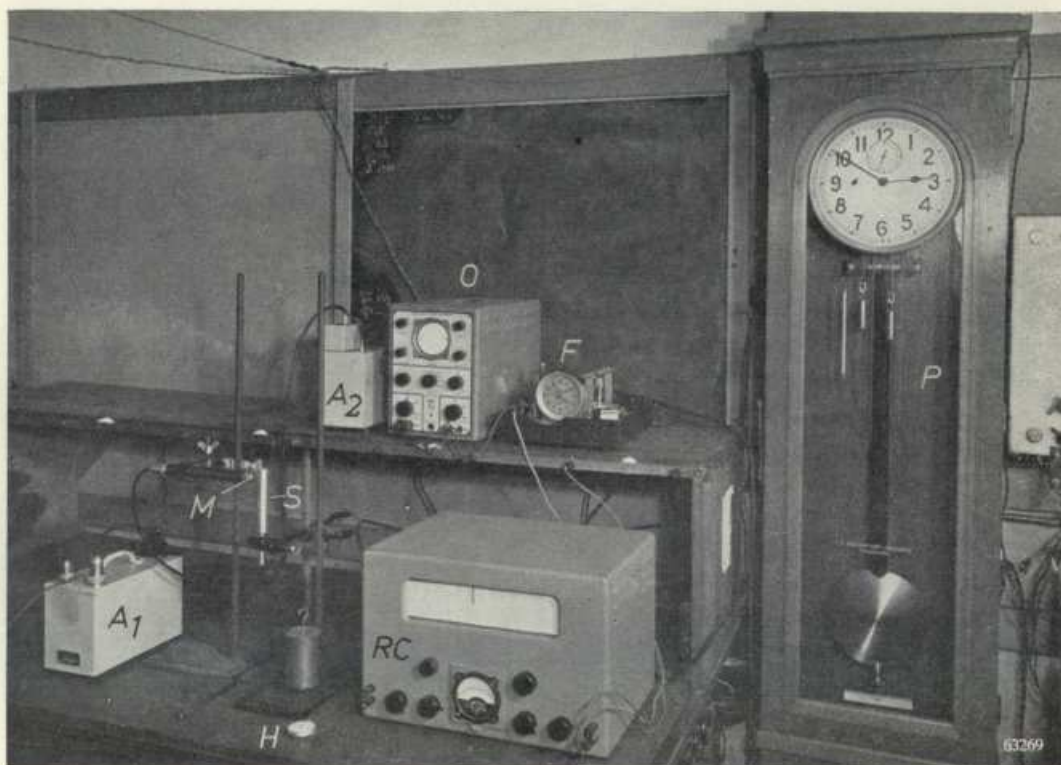


Fig. 3. Complete apparatuur voor het iken van stemvorken. S te iken stemvork, M microfoon, A_1 en A_2 versterkers, die tezamen de versterker A van fig. 2 vormen, O oscillograaf, RC hulposcillator, P slingeruurwerk, F synchroonklok, H stophorloge.

De fout in de gang van het slingeruurwerk kon kleiner gemaakt worden dan één seconde per etmaal, d.i. kleiner dan $1 : 10^5$; hiervoor heeft dus geen correctie te worden aangebracht. Evenmin is dit nodig voor de gang van het stophorloge, dat bij deze proef slechts zo kort loopt dat de fout geheel te verwaarlozen is.

Daar de afleesfouten bij het begin- en bij het eindpunt van de tijd T_1 kunnen optellen, is, bij een tot op 0,2 s afleesbaar stophorloge, de duur van T_1 tot op 0,4 s bekend. Omdat de meetnauwkeurigheid bij een stemvork van omstreeks 440 Hz, zoals boven werd afgeleid, ongeveer 0,01% moet bedragen, dient de duur van T_1 ten minste

en wel bij een aanwijzing op deze klok van 3 h 55' 35''. Het stophorloge gaf toen aan: 7,2''. Dus op het tijdstip waarop de synchroonklok 3 h 55' 35'' aanwees (het begin van T_2) was de stand van het slingeruurwerk: 2 h 37' 7,2'' (het begin van T_1). Na omstreeks een uur, bij 3 h 31' 0'' op het slingeruurwerk, werd opnieuw het stophorloge afgedrukt, en het werd stilgezet toen de synchroonklok 4 h 19' 20'' aanwees (einde van T_2). Het stophorloge stond toen op 7,8'', en werd dus stopgezet ten tijde 3 h 31' 7,8'' op het slingeruurwerk (einde van T_1).

We vinden dus: $T_1 = 3 \text{ h } 31' 7,8'' - 2 \text{ h } 37' 7,2'' = 3240,6''$, en $T_2 = 4 \text{ h } 19' 20'' - 3 \text{ h } 55' 35'' = 1425''$. Dus $f = (1425/3240,6) \cdot 1000 \text{ Hz} = 339,73 \text{ Hz}$.

Om afleesfouten te kunnen constateren, wordt de bepaling van het begin- en het eindpunt van T_1 en T_2 nog tweemaal herhaald; van de drie verkregen uitkomsten zijn in het algemeen de gelijklopende de juiste.

Correctie van de stemvork

Blijkt bij de meting dat de stemvork in frequentie iets van de gewenste waarde afwijkt, dan zal men haar willen corrigeren. Dit is alleen gemakkelijk uitvoerbaar als ze een te lage frequentie heeft: men kan dan, door van de eindvlakken der benen een weinig materiaal weg te nemen, de juiste frequentie zeer dicht benaderen. Dit moet echter zodanig gebeuren dat de benen onderling even lang blijven; een klein lengteverschil namelijk veroorzaakt reeds een aanzienlijke vergroting van de demping. Het is om deze reden dat wij voor deze stemvorken (fig. 1) de vorm van een ingezaagde omwentelingscylinder hebben gekozen. Het inkorten kan dan gemakkelijk en nauwkeurig geschieden door de eindvlakken iets af te draaien op een draaibank, nadat de zaagsnede tussen de benen tijdelijk is opgevuld met bijv. een plaatje messing.

Heeft men de frequentie f van de stemvork gemeten, dan is uit de formule die de frequentie weergeeft als functie van de afmetingen en de materiaalconstanten, zeer nauwkeurig te berekenen, hoeveel de benen moeten worden verkort. De bedoelde formule luidt ⁶⁾:

$$f = \frac{K^2 v}{(l + l_0)^2},$$

waarin K^2 een factor is die van de vorm der stemvork afhangt, v de snelheid van het geluid in het materiaal van de vork, l de lengte van de benen, en l_0 een constante, die in het onderhavige geval klein is ten opzichte van l (enige $\%$). Onder de lengte van de benen wordt verstaan de afstand van de trillingsknoop tot het einde; bij de beschreven vorm ligt de trillingsknoop ter hoogte van het hart der boring, waarin de zaagsnede uitmondt.

Nadat de benen van een te laag gestemde vork door afdraaien zijn verkort met het volgens deze formule berekende bedrag, is gewoonlijk de nog resterende frequentie-afwijking kleiner dan de gestelde tolerantie ($\pm 0,2$ Hz).

⁶⁾ Zie bijv.: Handbuch der Physik, deel 8, blz. 207 (Springer, Berlin 1927).

Heeft de stemvork een iets te hoge frequentie, dan is correctie ook nog wel mogelijk. Men moet dan de benen, ter hoogte van de trillingsknoop, iets dunner maken. Het is echter bijna niet te voorspellen, hoeveel materiaal men hier moet wegnemen. Vandaar dat wij steeds de ongecorrigeerde stemvork een iets te lage frequentie geven.

Het vervaardigen van dit type vork geschiedt deels op een draaibank, deels op een fraisbank. Eerst draait men een staaf af tot op de gewenste dikte van de benen, resp. van de steel, waarbij de met het oog op de symmetrie noodzakelijke centrering van de steel ten opzichte van de benen wordt verkregen. Vervolgens wordt op een fraisbank het gat geboord waarvan de as de hartlijn van de stemvork loodrecht snijdt, en ten slotte wordt de staaf overlangs, tot aan het gat, middendoor gefraisd. Het is duidelijk dat deze werkwijze veel eenvoudiger is dan het bewerken van de tweemaal vier zijvlakken van de stemvorkbenen met de gebruikelijke rechthoekige doorsnede, op welke bewerking dan nog de vormgeving en de centrering van de steel moeten volgen.

Met het oog op gewichtsbesparing en op roestvrijheid hebben wij als materiaal, in plaats van het gebruikelijke staal, een harde aluminiumlegering gekozen, hoewel deze, zoals al werd vermeld, een wat grotere absolute waarde van de temperatuurcoëfficiënt heeft.

Een nadeel van de door ons gekozen vorm en materiaal is, dat de stemvork, na te zijn aangeslagen en op een klankbodem te zijn geplaatst, zwakker van toon en minder lang hoorbaar is dan een gewone stemvork. Houdt men echter de vork aan het oor, dan is de nieuwe vorm, vooral bij lage frequenties, beter, door het in verhouding grotere stralende oppervlak van de benen.

Samenvatting. Beschreven wordt een methode waarmee men stemvorken nauwkeurig kan ijken, zonder te beschikken over een acoustische standaardfrequentie. Met behulp van een kathodestraaloscillograaf wordt de frequentie van een RC-oscillator gelijk gemaakt aan die van de te ijken stemvork. Op deze oscillator is een synchroonklok aangesloten, waarvan de secondewijzer één omwenteling per minuut zou maken indien de frequentie 1000 Hz bedroeg. Leest men op deze klok, na een interval T_1 , een tijdverschil T_2 af, dan is de gezochte frequentie $f = (T_2/T_1) \cdot 1000$ Hz. De duur van het interval T_1 wordt gemeten met behulp van een slingeruurwerk, waarvan de gang vóór en na de meting met radio-tijdsein en wordt gecontroleerd.

Is de gevonden frequentie lager dan de gewenste, dan kan men deze laatste zeer dicht benaderen door de benen van de stemvork iets te verkorten. Besproken wordt een bijzondere, cilindrische, vorm van stemvork, waarbij deze correctie gemakkelijk, met behoud van de vereiste symmetrie, op een draaibank kan worden uitgevoerd.

EXPERIMENTEEL ONDERZOEK VAN ELECTRISCHE NETWERKEN MET BEHULP VAN HET UITSCHAKELVERSCHIJSSEL

door J. van SLOOTEN.

621.317.75:621.317.333.8

Zoals bekend, geeft de reactie van een impedantie of van een electrisch netwerk op een stroom- of een spanningsprong waardevolle inlichtingen omtrent de aard van de impedantie of het netwerk. Tot dusverre is hiervan echter nog maar weinig gebruik gemaakt ter beantwoording van vragen als zich bij experimenteel werk in een radiolaboratorium herhaaldelijk voordoen: hoe groot is de zelfinductie van deze spoel?, welke demping heeft die kring?, is dat filter wel met de juiste weerstand afgesloten?, enz. Er is een eenvoudige, volgens de sprongmethode werkende, meetinrichting ontwikkeld die in deze leemte voorziet.

Sprongkarakteristiek

Reeds lang wordt in de theorie van de electrische netwerken bijzondere aandacht geschonken aan de reactie van een netwerk op het plotseling in- of uitschakelen van een gelijkspanning of een gelijkstroom aan de ingang ervan, aan de reactie dus op een spanning of een stroom in de vorm van een zg. eenheidsfunctie. De grafische voorstelling van deze reactie als functie van de tijd noemt men sprongkarakteristiek. Het is bekend dat deze karakteristiek even veel zegt als de frequentiekarakteristieken, die de amplitude en de faze der reactie van het netwerk beschrijven als functie van de frequentie ¹⁾. Wiskundig gesproken, is dus de sprongkarakteristiek gelijkwaardig met de frequentiekarakteristieken. Dit betekent echter niet dat het in de practijk onverschillig zou zijn over welk van deze gegevens men beschikt. In de televisie- en de radartechniek heeft men veel te maken met impulsen van eindige breedte; het is reeds lang bekend dat in zulke gevallen de sprongkarakteristiek een bruikbaar gegeven is dan de frequentiekarakteristieken. Men vindt namelijk de reactie van een netwerk op een impuls van eindige breedte door het verschil te nemen van twee gelijke sprongkarakteristieken waarvan de ene over de impulsbreedte ten opzichte van de andere is verschoven.

Voor het bestuderen van de reactie van netwerken op kort durende impulsen zijn reeds gecompliceerde apparaturen ontwikkeld ²⁾. Een veel eenvoudiger apparatuur zal echter in talrijke gevallen eveneens goede diensten kunnen bewijzen, niet alleen voor het onderzoek van vrij ingewikkelde

netwerken, maar ook voor allerlei routine-metingen. In het bijzonder indien geen hoge eisen worden gesteld aan de nauwkeurigheid van de metingen — bijv. bij steekproeven in de fabricage van radio-onderdelen als spoelen, bandfilters e.d. — kan veel tijd worden bespaard door gebruik te maken van een eenvoudige meetinrichting als hieronder zal worden beschreven.

Door middel van deze inrichting wordt de reactie van een impedantie of van een netwerk op een stroom in de vorm van een eenheidsfunctie zichtbaar gemaakt op het scherm van een kathodestraalbuis. Uit het verkregen oscillogram kunnen diverse conclusies worden getrokken, zoals we straks aan voorbeelden zullen laten zien. Aan het gebruik van een eenheidsfunctie, in plaats van impulsen, is het te danken dat de inrichting zo eenvoudig kon blijven. De reactie op een impuls kan desgewenst, zoals al werd vermeld, uit het oscillogram gemakkelijk worden afgeleid.

Vergelijkt men de reactie van een netwerk op een stroomimpuls (van eindige breedte) met die op een stroomspont van dezelfde amplitude, dan zijn deze reacties slechts dan van gelijke orde van grootte indien de impulsbreedte van de orde is van een periode van de reactie (als deze periodiek is), of van de tijdconstante van de reactie (als ze aperiodiek verloopt). Dit wil zeggen dat in een met impulsen werkende apparatuur, behalve de afstand der impulsen, ook de impulsbreedte afzonderlijk regelbaar zou moeten zijn. In principe vereist zulk een apparatuur dus een gecompliceerder schakeling dan een die met stroomsponten werkt.

Beschrijving van de apparatuur

De apparatuur bestaat uit een inrichting die de stroomspont levert welke door de te onderzoeken impedantie of het te onderzoeken netwerk wordt gevoerd, alsmede uit een oscillograafbuis met toebehoren.

¹⁾ Zie bijv.: J. Haantjes, Beoordeling van een versterker door middel van de sprongkarakteristiek, Philips techn. T. 6, 193-201, 1941.

²⁾ Zie bijv.: D. S. Espley, E. C. Cherry en M. M. Levy, The pulse-testing of wide-band networks, J. Inst. El. Engrs. 93, III A, 1176-1187, 1946.

Met het oog op het oscillografisch waarnemen kan niet worden volstaan met een eenmaal optredende sprong, maar moet men de sprong periodiek herhalen. Daartoe maken wij gebruik van de welbekende multivibrator van Abraham en Bloch. Deze kan zo worden ingericht dat hij niet alleen een blokvormige spanning met de gewenste frequentie levert — welke spanning een buis bestuurt die de blokvormige stroom levert — maar tevens een zaagtandvormige spanning, die nodig is voor de horizontale afbuiging van de elektronenbundel in de oscillograafbuis.

De schakeling van de multivibrator is weergegeven in fig. 1. De twee buizen *I* en *II* zijn onderling zo verbonden dat het spanningsverlies in de anodekring van de ene buis de andere een tijdlang afgeknepen houdt, en omgekeerd. Zodra door een aanvankelijk afgeknepen buis, bijv. *I*, enige stroom begint te vloeien (ten gevolge van het afnemen van de negatieve roosterspanning), doet de positieve terugkoppeling tussen de twee buizen de anodestroom van *I* verder toenemen. Hierdoor daalt de anodespanning van *I*, het rooster van *II* wordt derhalve sterker negatief en de anodestroom van *II* neemt af tot nu deze buis geheel is afgeknepen. Dan herhaalt het spel zich in omgekeerde richting, enz. De stroomovergang van de ene buis naar de andere geschiedt telkens vrij plotseling, zodat de anodespanning van de buizen bij benadering een rechthoekig verloop vertoont.

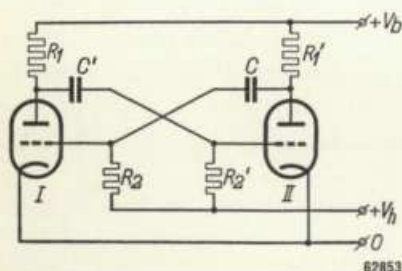


Fig. 1. Principeschema van de multivibrator. *I* en *II* trioden (of penthoden), R_1 en R_1' anodeweertstanden, R_2 en R_2' roosterweertstanden, C en C' koppelcondensatoren. V_b voedingspanning, V_h hulpspanning.

Zolang een buis van de multivibrator stroom doorlaat, is de roosterspanning van deze buis ongeveer nul. Gedurende de tijd dat de buis is afgeknepen loopt de roosterspanning op volgens een exponentiële functie. Indien de roosterweertstanden zijn verbonden met een punt van hoge positieve spanning, is deze functie echter nagenoeg lineair, daar dan slechts het eerste, bijna rechte, stukje van de exponentiële kromme wordt doorlopen. De genoemde positieve spanning (V_h in fig. 1) kan bijv. gelijk zijn

aan de voedingspanning V_b (300 V) van de anodekringen.

In fig. 2 is het verloop van de spanning op de anode en op het rooster van een der buizen weergegeven. De voornaamste afwijking van een blokvormig

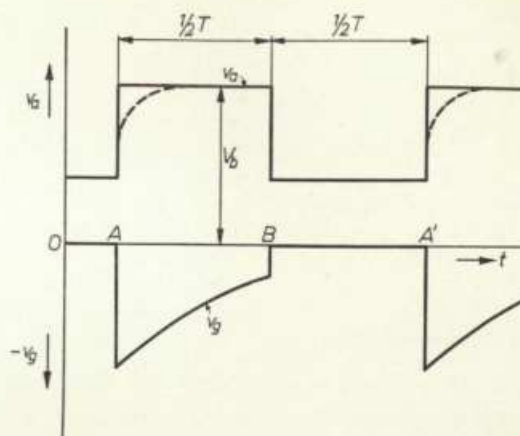
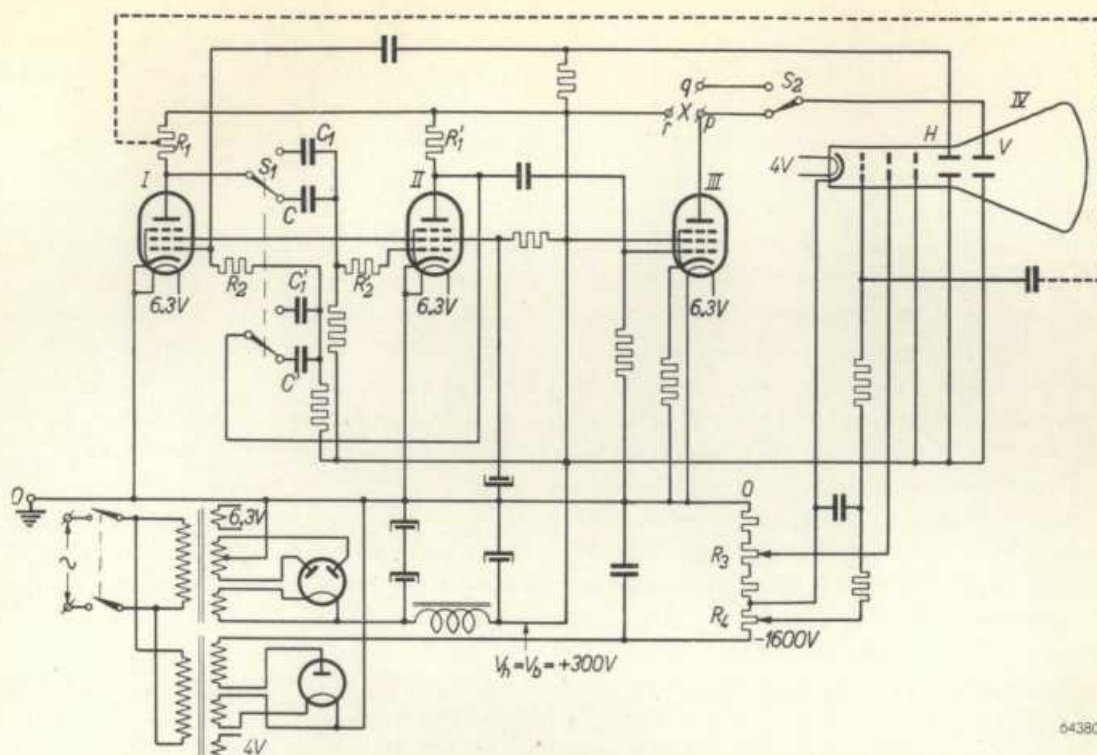


Fig. 2. Anodespanning v_a en roosterspanning v_r van een der multivibratorbuisen (op verschillende schalen). Bij het stroomloos worden van de buis (bij *A*) ontstaat de gestippeld getekende afronding, die niet aanwezig is als de buis stroom gaat doorlaten (bij *B*).

verloop van de anodespanning bestaat in de gestippeld aangegeven afronding. Bij het afknijpen van de buis (bijv. *I*) wordt namelijk de anodespanning niet onmiddellijk gelijk aan de voedingspanning V_b . De oorzaak hiervan is dat er in de andere buis aanvankelijk een vrij sterke roosterstroom loopt, die in hoofdzaak wordt onttrokken aan de koppelcondensator (C' in fig. 1), waardoor een spanningsval in de anodeweerstand (R_1) ontstaat. Door dit effect is de anodespanningsvorm bij het „uit”gaan van de buis minder fraai rechthoekig dan bij het „aan”gaan. Daarom wordt de scherpe spanningsprong bij het „aan”gaan gebruikt om in een derde buis — de schakelbuis — de anodestroom plotseling op nul te doen vallen. In de anodekring van de schakelbuis (een penthode) is de te onderzoeken impedantie of de ingang van het te onderzoeken netwerk geschakeld, waarvan dus het uitschakelverschijnsel (de spanning aan de impedantie of aan de uitgangsklemmen van het netwerk) op de oscillograaf wordt waargenomen.

In principe heeft men de derde buis niet nodig; men zou namelijk de te onderzoeken impedantie rechtstreeks in serie met een der anodeweertstanden van de multivibrator kunnen schakelen, in welke weerstanden immers ook stroomsprongen optreden. Indien echter de impedantie niet zeer klein is in vergelijking met de anodeweertstanden, wordt de werking van de multivibrator verstoord. Vandaar de wenselijkheid, als schakelbuis een afzonderlijke, derde, buis te gebruiken.

De frequentie van de multivibrator moet zodanig worden gekozen dat binnen een halve periode het waar te nemen uitschakelverschijnsel zo goed als



64380

Fig. 3. Complete schakeling van de oscillograaf. *I, II* multivibratorbuisen (type EL 41), *III* schakelbuis (EL 41), *IV* kathodestraalbuis (DG 10-3). R_1 en R_1' anodeweerstanden, R_2 en R_2' roosterweerstanden van de multivibrator. Met de schakelaar S_1 kunnen de koppelcondensatoren C en C' of C_1 en C_1' worden ingeschakeld, waarmee twee verschillende frequenties worden verkregen. Tussen p en r wordt de te onderzoeken impedantie X aangesloten (schakelaar S_2 in de getekende stand), of de ingang van een te onderzoeken vierpool, waarvan de uitgang wordt verbonden met q en r (S_2 in de bovenste stand). H platen voor de horizontale, V voor de verticale afbuiging. Met R_3 wordt de elektronenbundel gefocuseerd, met R_4 wordt de helderheid van het oscillogram ingesteld.

geheel is uitgestorven. Daar de stroom door de schakelbuis en de te onderzoeken impedantie afwisselend van nul op een zekere waarde $I_{\max}$ en van $I_{\max}$ weer op nul springt, treedt er beurtelings een inschakel- en een uitschakelverschijnsel op. Om te voorkomen dat de afbeeldingen van deze twee verschijnselen op de oscillograaf door elkaar heen lopen, wordt het inschakelverschijnsel hetzij geheel onzichtbaar gemaakt, hetzij tot een verticale lijn terzijde van het beeld gecomprimeerd. Wij komen hierop nog terug.

In fig. 3 is het volledige schema van de oscillograaf met toebehoren weergegeven. De te onderzoeken impedantie X wordt aangesloten tussen de klemmen p en r . Met de schakelaar S_2 in de getekende stand komt de spanning over de impedantie te staan op de afbuigplaten voor de verticale richting. Heeft men een vierpool te onderzoeken, dan verbindt men de ingangsklemmen met p en r , de uitgangsklemmen met q en r ; met S_2 in de andere stand wordt dan het spanningsverloop aan de uitgangsklemmen afgebeeld.

De gelijkstroomweerstand tussen de klemmen p en r moet niet hoger zijn dan ongeveer 5000 ohm, met het oog op het als maximum toelaatbare span-

ningsverlies (150 V) dat de anodegelijkstroom (30 mA) er in veroorzaakt; er moet voldoende spanning overblijven om de schakelbuis *III* goed te doen functionneren. Verder moet men er op letten dat er, wanneer de schakelaar S_2 in de bovenste stand staat, steeds een geleidende verbinding aanwezig is tussen de punten q en r , om het gemiddelde potentiaalverschil tussen deze punten nul te houden; de weerstand van deze verbinding mag hoog zijn, tot ongeveer 1 megohm.

Door koppelcondensatoren van verschillende capaciteit in te schakelen (met de schakelaar S_1) varieert men de frequentie van de multivibrator, dus de duur $T/2$ van een halve periode, waarin het oscillogram wordt beschreven. Geschikte waarden van $T/2$ zijn bijv. 1000 μs en 40 μs . Het is van belang deze duur nauwkeurig te kennen. Men kan hem het gemakkelijkst bepalen door tussen de klemmen p en r een weerstand aan te sluiten en de frequentie $1/T$ van de blokvormige spanning die over deze weerstand ontstaat, op een oscillograaf te vergelijken met de frequentie van een geijkte oscillator. Een andere (minder nauwkeurige) methode, waarbij geen oscillator nodig is, zullen we aanstonds beschrijven.

Een der platen voor de horizontale afbuiging (fig. 3) is over een koppelcondensator verbonden met een der roosters van de multivibratorbuizen. Uit fig. 2 is te zien dat de roosterspanning gedurende een halve periode nagenoeg lineair oploopt, zodat een eveneens nagenoeg lineaire tijdschaal wordt verkregen, en dat gedurende de andere halve periode de roosterspanning ongeveer nul is. Dit laatste betekent, dat, wanneer het uitschakelverschijnsel van de te onderzoeken impedantie wordt zichtbaar gemaakt, de afbeelding van het inschakelverschijnsel wordt samengedrukt tot een enkele verticale lijn geheel rechts in het beeld, die niet stoort (en in vele gevallen zelfs van nut is, zoals straks bij enige voorbeelden zal blijken). Desgewenst kan de verticale lijn geheel worden onderdrukt door, gedurende de desbetreffende halve periode, aan het stuurrooster van de kathodestraalbuis een negatieve spanning te leggen, die aan de multivibrator kan worden ontleend; daartoe brengt men de verbinding aan die in fig. 3 gestippeld is aangegeven.

We zullen nu aan enige voorbeelden laten zien hoe de beschreven oscillograaf met nut kan worden gebruikt.

Toepassingsvoorbeelden

Weerstand

De eenvoudigste te onderzoeken impedantie is uiteraard een weerstand, van bijv. 3000 ohm. Het verkregen oscillogram zal er uitzien als is weergegeven in fig. 4. Gedurende de halve periode waarin de stuurroosterspanning van de buis I (fig. 3) ongeveer nul is (BA' , fig. 2), bevindt de lichtstip zich ergens op een verticale lijn. Aan het begin van deze halve periode gaat de schakelbuis plotseling stroom doorlaten, en het daardoor ontstane spanningsverlies in de te onderzoeken weerstand R doet de lichtstip naar boven bewegen ³⁾.

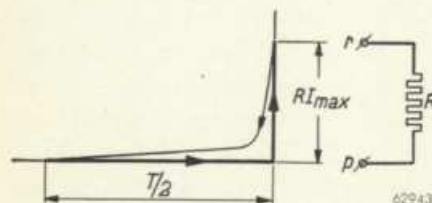


Fig. 4. Oscillogram verkregen met een weerstand R tussen de klemmen p en r (fig. 3). De lengte van de verticale lijn rechts is evenredig met de weerstand R , met de anodestroomamplitude I_{max} en met de gevoeligheid van de kathodestraalbuis.

³⁾ Hier en in de volgende voorbeelden is aangenomen dat de platen voor de verticale afbuiging zo zijn aangesloten dat het spanningsverlies dat door de anodestroom in de te onderzoeken impedantie wordt opgewekt, een afbuiging naar boven veroorzaakt.

Aldus wordt het inschakelverschijnsel zichtbaar als een verticale lijn op het scherm; de lengte van deze lijn is evenredig met R . Aan het eind van de beschouwde halve periode (bij A' , fig. 2) gebeuren er twee dingen tegelijk: de stroom door de schakelbuis wordt eensklaps nul, en de roosterspanning van de buis I neemt plotseling een hoge negatieve waarde aan. Het gevolg van een en ander is, dat de lichtstip zeer snel naar beneden en naar links beweegt, volgens een verloop dat niet ter zake doet (in fig. 4 is het dun aangegeven). In de nu aangebroken halve periode blijft de spanning over de weerstand nul, terwijl de roosterspanning van de buis I geleidelijk toeneemt; de lichtstip beschrijft dus van links naar rechts een horizontale lijn, en komt op het uitgangspunt terug als het volgende inschakelverschijnsel haar opnieuw omhoog werpt, en zo vervolgens ⁴⁾.

Door een bekende weerstand aan te sluiten, kan men de „gevoeligheid” van de oscillograaf bepalen. Deze is in de orde van 1 cm uitslag per 1000 ohm. De lengte van de verticale lijn die met een bepaalde weerstand wordt verkregen, kan worden vergeleken met het oscillogram van samengestelde impedanties.

Parallelschakeling van weerstand en capaciteit

Indien een condensator met betrekkelijk kleine capaciteit C parallel met een weerstand R wordt geschakeld ($RC \ll T/2$), wordt een figuur ver-

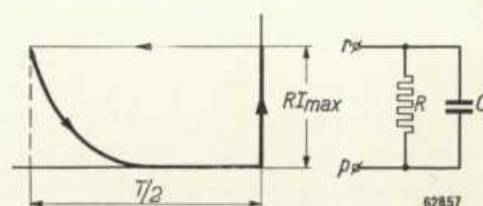


Fig. 5. Oscillogram verkregen met een weerstand R die is overbrugd door een kleine capaciteit C („klein” wil zeggen: $RC \ll T/2$).

kregen als is afgebeeld in fig. 5. Rechts is weer de samengedrukte afbeelding van het inschakelverschijnsel te zien. Als de stroom door de schakelbuis van I_{max} op nul is gevallen, neemt de spanning v over de R - C -keten exponentieel met de tijd t af volgens

$$v = R I_{max} e^{-\frac{t}{RC}} \dots \dots (1)$$

Gedurende de stroomovergang van de ene multivibratorbuis naar de andere beweegt de electronen-

⁴⁾ Bij de beschreven gang van zaken komt het oscillogram ongeveer midden op het scherm te staan, daar een scheidscondensator er voor zorgt dat de gemiddelde afbuigspanning voor de horizontale richting nul is.

bundel in de kathodestraalbuis eerst snel van de rechter- naar de linkerbovenhoek van het oscillogram, en vervolgens langzamer van links boven naar rechts beneden. Indien de oscillograaf zorgvuldig is gemonteerd, zodat parasitaire capaciteiten klein zijn gehouden, duurt de genoemde snelle terugslag niet langer dan ongeveer $1 \mu s$, zodat deze tijd kan worden verwaarloosd ten opzichte van $T/2$.

Als de duur $T/2$ van de slag bekend is, kan men schatten in hoeveel tijd de spanning v tot op $1/e$ (circa 37%) van de topwaarde is gedaald. Daar deze tijd gelijk is aan RC (zie (1)), kan men, bij bekende waarde van R , tot een ruwe schatting komen van de capaciteit C .

Omgekeerd kan men met bekende waarden van R en C de slagduur $T/2$ bepalen, zonder dat men de in een vorige paragraaf genoemde geijekte oscillator nodig heeft. De nauwkeurigheid is het grootst indien RC en $T/2$ dezelfde orde van grootte hebben.

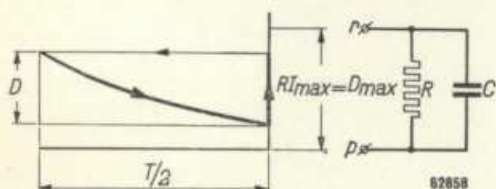


Fig. 6. Oscillogram verkregen met een weerstand R die is overbrugd door een capaciteit C , waarbij RC niet klein is ten opzichte van $T/2$.

Het oscillogram krijgt dan een gedaante als in fig. 6 is voorgesteld. Tijdens de halve periode van uitgeschakelde stroom blijft v aanmerkelijk groter dan nul, en bij ingeschakelde stroom bereikt v de waarde $RI_{\max}$ niet. Een eenvoudige berekening leert, dat de verticale amplitude D op het scherm nu de volgende waarde heeft:

$$D = D_{\max} \frac{1-p}{1+p}, \quad \dots \quad (2)$$

waarin $p = e^{-T/2RC}$ en $D_{\max}$ de met $RI_{\max}$ corresponderende amplitude is die wordt verkregen bij zeer kleine waarden van C . Kiezen we nu C zo dat $D = \frac{1}{2} D_{\max}$, dan volgt uit (2) dat $p = 1/3$, zodat

$$\frac{1}{2} T = RC \ln 3 = 1,1 RC.$$

Op deze wijze kan men, met bekende R en C , de slagduur $T/2$ bepalen.

Parallelschakeling van weerstand en zelfinductie

Beschouwen we nu het geval van een zelfinductie L die is parallelgeschakeld met een weerstand R , waarbij de verhouding L/R klein is in vergelijking met $T/2$.

Het oscillogram vertoont de vorm van fig. 7. Nadat de stroom door de schakelbuis op nul is gevallen, blijft door de traagheidswerking van de zelfinductie de stroom in de zelfinductietak nog enige

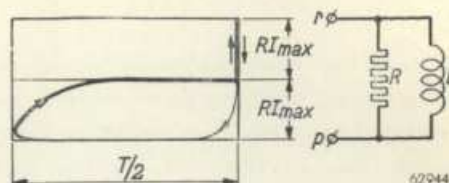


Fig. 7. Oscillogram verkregen met een weerstand R die is overbrugd door een zelfinductie L , waarbij $L/R \ll T/2$.

tijd vloeien. Dit geeft aanleiding tot een positieve spanning over R , dus volgens de in noot 3) gemaakte onderstelling een uitslag naar beneden. Deze uitslag neemt exponentieel af volgens de formule

$$v = RI_{\max} e^{-\frac{R}{L}t}.$$

Op analoge wijze als boven werd beschreven voor capaciteiten kunnen op globale wijze zelfinducties worden gemeten, het nauwkeurigst door vergelijken met een of meer bekende zelfinducties.

L-C-kring

Het oscillogram dat met een L - C -kring wordt verkregen, is dat van een gedempte trilling (fig. 8) — althans wanneer de damping van de kring niet zo groot is dat het verschijnsel aperiodiek verloopt, hetgeen we niet onderstellen.

De formule voor de spanning v over de condensator luidt:

$$v = V_0 e^{-\frac{r}{2L}t} \cos \omega_0 t,$$

indien V_0 de aanvangswaarde van v is, r de in de zelfinductietak geconcentreerd gedachte verliesweerstand en $\omega_0 = 2\pi$ maal de eigen frequentie van de kring.

Uit de verhouding van opeenvolgende topwaarden van v kan gemakkelijk de damping van de kring worden bepaald. Ook kan men zelfinducties meten,

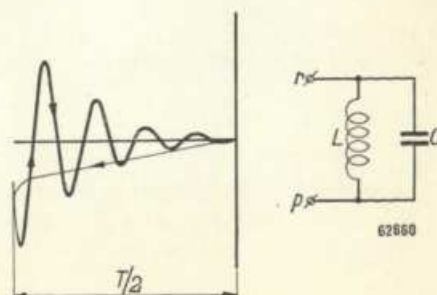


Fig. 8. Oscillogram van de spanning over een gedempte trillingskring.

door het aantal trillingen in een bepaalde tijdsduur te vergelijken met het aantal dat, met dezelfde capaciteit en een bekende zelfinductie, in een even lange tijd wordt uitgevoerd.

Bandfilter

Ook de in de radiotechniek zo veelvuldig voorkomende bandfilters kunnen door middel van de sprongkarakteristiek worden bestudeerd. Een bandfilter kan bestaan uit twee L - C -kringen, die bijv. door een wederzijdse inductie M zijn gekoppeld (zie fig. 9, waarin eenvoudigheidshalve de twee kringen identiek zijn ondersteld).

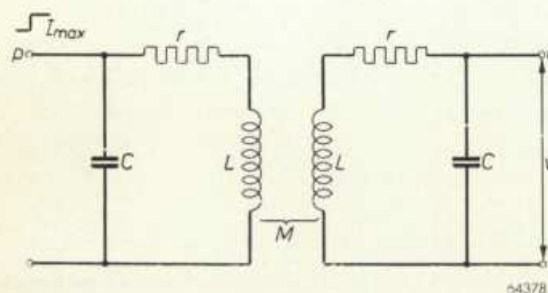


Fig. 9. Bandfilter met twee gelijke kringen, gekoppeld door de wederzijdse inductie M .

Een karakteristieke grootte van een bandfilter is de koppelfactor k , die voor het in fig. 9 afgebeelde filter is gedefinieerd als M/L . Gaat men het gedrag van het filter na als functie van k , dan vindt men een merkwaardig verschil tussen de methode van de sprongkarakteristiek en die der frequentiekarakteristieken. Past men deze laatste methode toe, meet men dus de amplitude van de uitgangsspanning als functie van de frequentie, dan vindt men, zoals bekend, het volgende: bij losse koppeling vertoont de frequentiekarakteristiek één, vrij lage, top, bij de hoekfrequentie $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, en bij geleidelijk vaster wordende koppeling wordt de top aanvankelijk hoger, tot hij van een zekere kritische koppeling af niet meer hoger wordt, doch zich in twee toppen verdeelt, die aan weerszijden van ω_0 liggen. De grootte k_{cr} van de kritische koppelfactor is gelijk aan de dempingsfactor δ :

$$k_{cr} = \delta \equiv r/\omega_0 L = r \sqrt{\frac{C}{L}}.$$

Voor het verloop (als functie van de tijd) van de secundaire spanning v van een bandfilter, als aan de primaire klemmen een stroomsprong I_{max} wordt toegevoerd, kan men de volgende benaderingsformule afleiden:

$$v = I_{max} \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot e^{-\frac{r}{2L}t} \cdot \sin \frac{1}{2} k (\omega_0 t - \delta) \cdot \cos (\omega_0 t - \delta). \quad (3)$$

(De benadering bestaat hierin dat zowel de dempingsfactor δ als de koppelfactor klein is aangenomen, bijv. $\delta < 0,1$ en $k < 0,1$. In de regel is hieraan voldaan.)

Aan de formule (3) is te zien, dat de secundaire kring trilt met de eigen hoekfrequentie ω_0 (de cosinusterm), en dat deze trilling is gemoduleerd met de veel lagere hoekfrequentie $\frac{1}{2} k \omega_0$ (de sinusterm); dit blijkt ook uit de grafische voorstelling (fig. 10). Voorts ziet men aan de formule, dat de trillingsamplitude de natuurlijke demping ondergaat (term met de e -macht).

De term $\sin \frac{1}{2} k (\omega_0 t - \delta)$ beantwoordt aan het heen en weer schommelen van de energie tussen de twee kringen. In fig. 10 ziet men, dat er een aantal maxima in de amplitude ontstaan. De verhouding van twee opeenvolgende maxima hangt af van de waarde van δ/k . De tijd τ tussen twee maxima is gegeven door $\frac{1}{2} k \omega_0 \tau = \pi$, dus is

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega_0 k}.$$

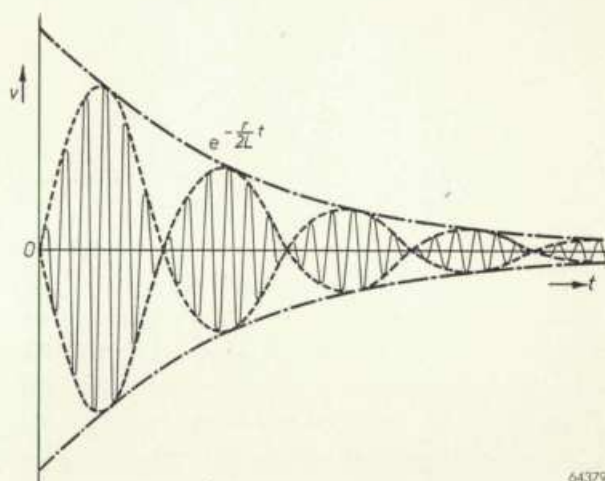


Fig. 10. Verloop van de secundaire spanning v van het bandfilter volgens fig. 9, indien aan de eerste kring een stroomsprong wordt toegevoerd.

De verhouding a van een maximum in de gestippeld getekende omhullende (fig. 10) tot het vorige maximum is dus:

$$a = e^{-\frac{r}{2L} \cdot \frac{2\pi}{\omega_0 k}} = e^{-\frac{\pi \delta}{k}}. \quad (4)$$

Kunnen we aan de vorm van de frequentiekarakteristiek van een bandfilter onmiddellijk zien of de koppeling lossier dan wel vaster is dan de kritische koppeling (één top, resp. twee toppen in de kromme), bij de sprongkarakteristiek (fig. 10) ontbreekt een dergelijk eenvoudig criterium; bij het passeren van de kritische koppeling verandert deze kromme niet opvallend van vorm.

Dit laatste is echter geen beletsel om uit een oscillografisch opgenomen sprongkarakteristiek iets over de koppeling te kunnen concluderen. Volgens (4) neemt de verhouding a regelmatig toe met vaster wordende koppeling; bij de kritische koppeling neemt a de waarde $e^{-\pi} \approx 1/23$ aan, dwz. het tweede en de volgende maxima zijn dan al zo klein dat ze op de oscillograaf bijna niet meer zijn waar te nemen. Vertoont het oscillogram daarentegen duidelijk verscheidene maxima, zoals fig. 10, dan kan men daaruit de gevolgtrekking maken dat de koppeling aanzienlijk vaster is dan de kritische; door de verhouding a uit het oscillogram op te meten en formule (4) toe te passen, kan men dan de verhouding δ/k met redelijke nauwkeurigheid bepalen.

Laag doorlatend filter

Als laatste voorbeeld bespreken we nog het geval

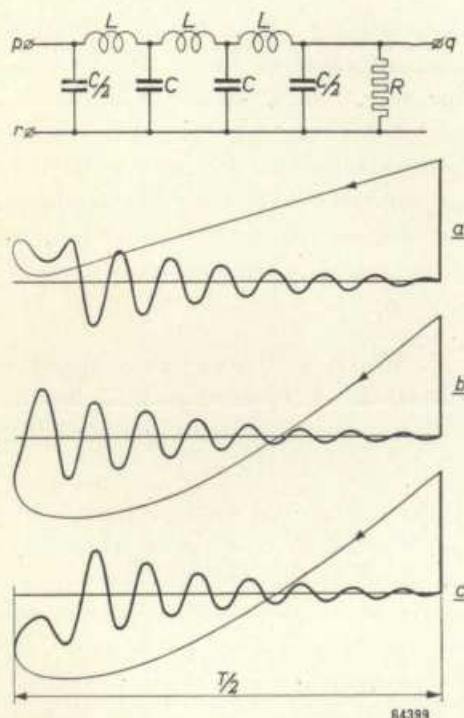


Fig. 11. Boven: laag doorlatend filter, afgesloten door een weerstand R . Wordt aan de ingang een stroomsprong toegevoerd, dan verloopt de uitgangsspanning volgens a , b of c , naar gelang R te groot is, de juiste waarde heeft, resp. te klein is.

van een laag doorlatend filter. We nemen aan dat over de uitgangsklemmen een afsluitweerstand R is aangebracht, en dat over de ingangsklemmen geen weerstand aanwezig is (fig. 11). Al naar gelang de afsluitweerstand een te hoge, de juiste of een te lage waarde heeft, ontstaan oscillogrammen van de uitgangsspanning van het type van fig. 11a, resp. b of c . Indien ook over de ingangsklemmen een weerstand is aangebracht, van een waarde die ongeveer gelijk is aan de karakteristieke impedantie van het filter, ontstaan soortgelijke figuren, doch de oscillaties zijn dan veel zwakker. De gunstigste waarde van de weerstand is die waarbij de oscillaties zo zwak mogelijk zijn; deze waarde kan met behulp van de oscillograaf gemakkelijk experimenteel worden bepaald.

Op dezelfde wijze kan het effect van ongelijke filtersecties worden onderzocht, waarvoor anders ingewikkelde berekeningen nodig zouden zijn.

Hoewel het oscillografische onderzoek volgens de sprongmethode geen zeer nauwkeurige kwantitatieve uitkomsten toelaat, biedt deze methode het voordeel dat men vlug tot een inzicht komt op welke schakelementen het in een bepaald geval in de eerste plaats aankomt, en welke van minder essentieel belang zijn. Vooral in kleine laboratoria, waar men slechts over betrekkelijk geringe hulpmiddelen beschikt (zowel wat apparatuur als wat personeelbezetting betreft), zal de hier beschreven methode van onderzoek met voordeel kunnen worden toegepast.

Samenvatting. Beschreven wordt een eenvoudige experimentele methode ter bestudering van de reactie van een electrisch netwerk of van een impedantie op het plotseling uitschakelen van een constante gelijkstroom. De spanning die door dit uitschakelen ontstaat, wordt als functie van de tijd waargenomen op een kathodestraaloscillograaf. Daartoe geschiedt het uitschakelen periodiek, met behulp van een multivibrator, die tevens de tijdasspanning voor de oscillograaf levert. Uit het waargenomen spanningsverloop laten zich omtrent het netwerk of de impedantie een aantal conclusies trekken, zoals aan een aantal voorbeelden wordt gedemonstreerd. De methode leent zich vooral voor gevallen waarin men vlug een antwoord wenst dat niet aan zeer hoge kwantitatieve eisen behoeft te voldoen.

OVERZICHT VAN RECENTE WETENSCHAPPELIJKE PUBLICATIES DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

Van deze publicaties, voorzover niet met een sterretje * gemerkt, verstrekt de Administratie van het Natuurkundig Laboratorium, Kastanjelaan, Eindhoven, op aanvraag overdrukken.

1920: K. S. Knol: Electromagnetische golven in rechthoekige golfpijpen (T. Ned. Radiog. 15, 53-74, 1950, No. 2).

Overzicht van de theorie van golfpijpen. De methode van Brillouin voor rechthoekige golfpijpen wordt nader besproken. De oplossing van de vergelijkingen van Maxwell in het inwendige van een golfpijp blijkt te bestaan uit de superpositie van de invallende golf en van drie gereflecteerde golven die ontstaan als een vlakke lineair gepolariseerde electromagnetische golf valt op twee onderling loodrechte metalen wanden. Enige praktische toepassingen worden genoemd, en beschreven wordt hoe men de voortplanting van TE_{01} -golven in rechthoekige golfpijpen kan bestuderen met behulp van een rubber membraan (zie Philips techn. T. 11, 156-163, 1949, No. 5).

1921: J. D. Fast: Ageing of iron and steel (Iron and Coal Trades Review 160, 837-844, April 1950).

Onderzoek over de rol van zuurstof, stikstof en koolstof bij het verouderen van ongelegeerd staal en van mangaanhoudend staal. Voor dit doel werd eerst zuiver ijzer bereid en werden hieraan bekende hoeveelheden van diverse verontreinigingen, afzonderlijk of gezamenlijk, toegevoegd.

Afschrikveroudering: Uit bepalingen van de hardheid volgens Vickers blijkt dat koolstof en stikstof een aanzienlijke afschrikveroudering in overigens zuiver ijzer veroorzaken. Anderzijds is de afschrikveroudering van zuurstofhoudend ijzer zeer gering. Toevoeging van 0,5% mangaan heeft geen invloed op het effect van koolstof, maar onderdrukt praktisch geheel de afschrikveroudering van stikstofhoudend staal. Dit werd bevestigd door de bepaling van de elastische demping. Waarnemingen van de demping van torsietrillingen als functie van de temperatuur leren dat het maximum dat door stikstof wordt veroorzaakt, door toevoeging van 0,5% Mn naar de zijde der hoge temperaturen wordt verplaatst en tevens verbreed. De proeven wijzen

er op, dat de stikstofatomen bij voorkeur interstitieel geplaatst zijn en wel in de onmiddellijke nabijheid van een mangaanatoom. De waargenomen demping bewijst, dat de N-atomen heen en weer springen rondom de Mn-atomen, maar deze niet verlaten. Verhitting tot 200 °C gedurende enige tientallen uren is nodig om in Mn-houdend staal zich een merkbare hoeveelheid stikstof te doen afscheiden.

Vervormingsveroudering: Zuurstof veroorzaakt geen vervormingsveroudering in ijzer. Deze veroudering wordt in hoofdzaak door stikstof veroorzaakt; de maximale werking wordt reeds bereikt bij 0,001% N. Zelfs bij kamertemperatuur verloopt deze veroudering snel. Vervormingsveroudering door koolstof vindt slechts plaats bij hogere temperatuur, bijv. 100 °C. Het verschil tussen stikstof en koolstof berust voornamelijk op hun verschillende oplosbaarheid in ijzer. De snelheid van verouderen wordt bepaald door het product van de diffusiecoëfficiënt en de oplosbaarheid. Mangaan heeft geen merkbare invloed op de vervormingsveroudering.

1922: N. W. H. Addink: A rapid and accurate method of measuring line intensities in spectrochemical analysis (Spectrochimica Acta 4, 36-42, 1950, No. 1).

Beschrijving van een methode om de intensiteit van spectraallijnen voor spectrochemisch onderzoek te meten, gebaseerd op visuele vergelijking van de te meten lijnen met lijnen van gestandaardiseerde zwarting. De methode geeft resultaten die even goed zijn als die verkregen met een densitometer (nauwkeurigheid 5%). Een correctie voor zwarting van de ondergrond wordt volgens genoemde vergelijkmethode automatisch aangebracht. Met deze methode kan de kwantitatieve analyse belangrijk worden versneld, daar de kwalitatieve beoordeling van het spectrum en de meting van lijnintensiteiten worden gecombineerd en geen densitometer nodig is. Enkele voorbeelden van analyses worden gegeven en de benodigde tijd vermeld.

Rectificatie. No. 1906 van deze overzichten (Philips techn. T. 12, 214, 1950, No. 7) is abusievelijk voorzien van een sterretje; van het desbetreffende artikel zijn wel overdrukken beschikbaar.